





HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO
Astronomía y Astrofísica



HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO
Astronomía y Astrofísica

Alberto Carramiñana

William Lee

Coordinadores



MÉXICO, 2014

Primera edición, 2014

D.R. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Av. Insurgentes Sur 1582
Colonia Crédito Constructor
México D.F.
ISBN Colección: 978-607-8273-01-0
ISBN Volumen: 978-607-8273-02-7

D.R. Academia Mexicana de Ciencias, A. C.
Los Cipreses S/N
Pueblo San Andrés Totoltepec
México D.F.
ISBN Colección: 978-607-96209-8-1
ISBN Volumen: 978-607-96209-9-8

D.R. Secretaría Ejecutiva del Consejo Consultivo de Ciencias
San Francisco 1626-305
Colonia del Valle
México D.F.
ISBN Colección: 978-607-9138-08-0
ISBN Volumen: 978-607-9138-09-7

haciadondevalaciencia@ccc.gob.mx
haciadondevalaciencia.org

Impreso en México

ÍNDICE

Presentación	
HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO.....	9
1. Introducción	
<i>Alberto Carramiñana y William Lee</i>	13
2. Demografía de la investigación astronómica en México	
<i>Itziar Aretxaga</i>	17
3. La comunidad astronómica mexicana. Su impacto en el contexto internacional y en la formación de recursos humanos	
<i>Manuel Peimbert</i>	29
4. El presente y el futuro de la radioastronomía en la UNAM	
<i>Luis Felipe Rodríguez Jorge</i>	35
5. La astronomía mexicana en colaboraciones internacionales: la perspectiva de la radioastronomía	
<i>Laurent Loinard</i>	43
6. Cómo aprovechar nuestros recursos naturales en materia de astronomía para el desarrollo de infraestructura	
<i>William Lee</i>	47
7. La promoción de la astronomía y sus grandes proyectos en México	
<i>Héctor Bravo Alfaro</i>	59



8. La interacción de la astronomía con el sector industrial, tecnológico y productivo <i>Vicente Bringas Rico</i>	67
9. El Gran Telescopio Milimétrico <i>Alfonso Serrano</i> <i>David H. Hughes</i>	71
10. El observatorio astronómico nacional en San Pedro Mártir, Baja California <i>J. Jesús González González</i>	79
11. El observatorio de rayos gamma <i>HAWC</i> <i>Alberto Carramiñana</i>	89
12. Semblanza de los autores	103
13. Líneas de acción para el futuro de la astronomía y la astrofísica en México	109
14. Créditos del programa HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO	123
15. Instituciones de adscripción de los participantes	131



PRESENTACIÓN

HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO

En febrero de 2012, la Academia Mexicana de Ciencias, AMC, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Conacyt, y el Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República, CCC, decidieron realizar un proyecto para analizar el estado de la ciencia mexicana en el mundo a fin de detectar áreas de oportunidad para el mejor desarrollo de la misma y obtener propuestas específicas para la mayor contribución de ellas al avance nacional.

Con ese propósito en mente, el proyecto consideró pertinente usar la palabra ciencia para describir las actividades de investigación y desarrollo practicadas de manera seria y sistemática en todos los campos del saber. Decidió, asimismo, organizar conjuntamente –dentro del marco del Convenio Tripartita AMC-Conacyt-CCC que les une–, una serie amplia de mesas redondas en alrededor de 30 áreas del conocimiento vistas desde tres perspectivas diferentes: la académica o disciplinar, la tecnológica o instrumental, y la sectorial o de aplicación.

Para ello se conformó un Comité Organizador, mismo que invitó a sesenta reconocidos especialistas en todas las áreas del conocimiento para que, cada uno de ellos, organizase al menos una mesa redonda sobre un tema específico en la que participasen otros cuatro especialistas a fin de cubrir de mejor manera cada tema y obtener visiones diferentes sobre el mismo. Se insistió, asimismo, en que para cada tema se diesen al menos dos mesas redondas: una en el área metropolitana del Valle de México y otra fuera de ella. Esto es, se procuró recabar la visión de las personas que trabajan fuera del centro del país.

En la mayor parte de los casos la respuesta fue no sólo positiva sino entusiasta; ha habido casos en que los invitados propusieron más mesas sobre un tema, e incluso ocasiones en que se propusieron diversas mesas en torno a temas no considerados inicialmente. Así, hasta el momento de la impresión de este volumen se han llevado a cabo 95 mesas redondas.

Este proyecto generó gran interés en la sociedad. A las mesas asistieron varios miles de personas.

Por la relevancia y riqueza de ideas y propuestas que surgieron de las mesas redondas, el Conacyt, la AMC y el CCC decidieron publicar una serie de libros que presentan el panorama de hacia dónde va y debe ir la ciencia en México.

HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO
Astronomía y Astrofísica



INTRODUCCIÓN

Alberto Carramiñana y William Lee***

INTRODUCCIÓN

La investigación en astronomía y astrofísica requiere de tres ingredientes esenciales para tener un impacto relevante en la sociedad: personal con formación de alto nivel en física, astronomía y las ingenierías; infraestructura experimental y de laboratorios, tanto en observatorios como en equipos de cómputo de alto rendimiento; recursos sostenidos y diversos en los plazos de desarrollo de los proyectos. Es sólo con una combinación apropiada de todo lo anterior, que a su vez necesita de una vinculación estrecha entre la academia, el sector educativo y el productivo e industrial, que se podrá asegurar la operación y crecimiento de los centros de investigación en estas disciplinas. Al mismo tiempo, y como resultado directo de ello, se podrá contar con un círculo virtuoso de retroalimentación donde el impacto económico y social sean de beneficio general para la población.

La astronomía contemporánea emplea distintas bandas del espectro para el estudio del cosmos: algunas de estas bandas, las correspondientes a las ondas de radio, el óptico, y los rayos gamma de muy alta energía, pueden estudiarse desde la superficie de la Tierra; otras, como una fracción importante del infrarrojo y el ultravioleta, los rayos X y rayos gamma de energía baja o media, sólo son observables mediante observatorios espaciales. La observación astronómica en observatorios terrestres requiere invariablemente el uso de técnicas sofisticadas bajo condiciones especiales,

* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

** Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

y los sitios capaces de proveer estas condiciones son escasos, al punto que pueden considerarse como recursos naturales. Por ejemplo, observaciones en la banda óptica –luz visible– requieren sitios montañosos, oscuros, mayormente despejados de nubes y con vientos en flujos laminares; observaciones en la banda milimétrica se hacen en sitios con bajo contenido de vapor de agua en la atmósfera, condiciones alcanzables en sitios de alta montaña; y la detección de rayos gamma, o fotones de muy alta energía, se hace aprovechando a la atmósfera terrestre como parte del detector, exigiendo condiciones especiales en el sitio de observación.

México tiene la gran fortuna de contar con una geografía ideal para el desarrollo de observatorios astronómicos: la cordillera de la península de Baja California alcanza los 3000 m de altitud a una distancia de tan sólo 60 kilómetros de la costa. En estas condiciones, el viento del mar alcanza las montañas bajo flujo laminar idóneo para la observación astronómica; aunado a esto tenemos un sitio alejado de la iluminación urbana y por ende particularmente oscuro. Estas condiciones fueron identificadas por Guillermo Haro en los años sesenta del siglo pasado y permitieron el establecimiento del Observatorio Astronómico Nacional (OAN) de San Pedro Mártir, operado hoy por el Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Por otro lado, el altiplano del centro del país rebasa en varios sitios los 4000 m de altitud, condiciones de alta montaña necesarias para el desarrollo de instrumentos como el Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano* (GTM) y el observatorio *HAWC*, en el sitio de Sierra Negra operado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).

Sin embargo, el desarrollo de estos observatorios sigue enfrentándose a dificultades inherentes a un país aún en búsqueda de su desarrollo y que dedica una proporción baja de su presupuesto a la ciencia. En estas contribuciones, Itziar Aretxaga del INAOE, da un recuento muy detallado del mapa de la astronomía mexicana a nivel nacional, seguido de consideraciones por Manuel Peimbert del Instituto de Astronomía de la UNAM, del impacto que ella tiene y ha tenido en un contexto internacional, así como de la importancia de la formación de recursos humanos, y del comparativo de México con otros países. Enseguida Luis Felipe Rodríguez Jorge y Laurent Loinard

—ambos del Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM— hacen un recuento del estado la investigación en radioastronomía en la UNAM y en México, y de cómo las colaboraciones internacionales han sido clave para el éxito de esta disciplina en nuestro país. William Lee del Instituto de Astronomía de la UNAM y Héctor Bravo-Alfaro de la Universidad de Guanajuato, plantean como aprovechar nuestros recursos naturales para el desarrollo de infraestructura, y la promoción de la astronomía y de sus grandes proyectos como un elemento clave para este desarrollo, y Vicente Bringas Rico del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) hace la liga fundamental que debe tener la investigación astronómica, por sus necesidades de infraestructura, con el sector industrial, tecnológico y productivo para beneficio económico de la población en general. Este es un ingrediente muy importante, en el que México no ha incursionado plenamente aún, y que debe ser concretado más allá de la astronomía para contar con una economía genuinamente basada en conocimiento y desarrollos propios. Finalmente, David Hughes del INAOE, Jesús González del IA-UNAM y Alberto Carramiñana del INAOE, presentan respectivamente tres proyectos globales en los sitios anteriormente citados, a saber, el Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano*, el sitio del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, y el observatorio de rayos gamma *HAWC*.

El GTM es el proyecto científico más ambicioso emprendido por nuestro país. A poco más de veinte años de iniciado el proyecto, el GTM enfrenta la paradoja de rendir sus primeros frutos con la terminación de la superficie del telescopio aún pendiente. El GTM todavía tiene por delante el concretarse plenamente como una herramienta de investigación científica de frontera para la astronomía mexicana, siendo que importantes grupos radio-astrofísicos del país han sabido capitalizar su participación en observatorios situados más allá de nuestras fronteras, como el *Very Large Array (VLA)* en Nuevo México. Por otro lado, el desarrollo del GTM ilustra el beneficio de instalar infraestructura en sitios privilegiados, la cual ha permitido el desarrollo de otros proyectos científicos de punta en el volcán Sierra Negra, como es el observatorio de rayos gamma *HAWC*, colaboración de dos docenas de instituciones de México y Estados Unidos, que ya ha puesto en operación científica el mayor detector Čerenkov de agua a nivel mundial.

La infraestructura del OAN-SPM no ha tenido la renovación necesaria para mantenerse plenamente a la vanguardia desde los años setenta, y el observatorio de San Pedro Mártir sigue operando bajo la contradicción de contar con una infraestructura limitada en un sitio con condiciones excepcionales a nivel mundial. Sin embargo, ya está en curso una mejora en los servicios básicos de energía y telecomunicaciones, y los primeros proyectos internacionales ya están rindiendo frutos. Continuar su desarrollo debe ser una prioridad para la astronomía mexicana.

La comunidad académica astronómica de México se encuentra hoy en una posición privilegiada pero aún frágil. Requiere de un consistente y continuo trabajo para consolidarse y alcanzar plenamente su potencial para enriquecer el conocimiento universal, para beneficio del desarrollo de la ciencia de México, y por el bien del desarrollo tecnológico, económico y humano del país.

DEMOGRAFÍA DE LA INVESTIGACIÓN ASTRONÓMICA EN MÉXICO

*Itziar Aretxaga**

CRECIMIENTO DE LA COMUNIDAD ASTRONÓMICA NACIONAL

La astronomía en México se practica desde la época mesoamericana, aunque poco sabemos del desarrollo de la masa demográfica que la practicaba. Si bien hubo ilustres mexicanos que desarrollaron actividades astronómicas durante todas las épocas de la historia^(1,2,3), no fue sino hasta 1878 que se inauguró el primer observatorio profesional dotado de telescopios en el país, el Observatorio Astronómico Nacional (OAN), que en 1929 pasó a la custodia de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Varios astrónomos e historiadores^(2,4,5) datan el comienzo de la astronomía moderna, entendida como el estudio predictivo e interpretativo de los mecanismos de funcionamiento de los astros, en 1942, cuando se inauguró el Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla, en las afueras de la ciudad de Puebla. Es también en esta época cuando se asienta la primera doctora (o doctor) en astronomía en el país⁽⁶⁾, la Dra. Pişmiş.

En los años cincuenta comienza un incipiente crecimiento de la comunidad astronómica nacional. Los pocos astrónomos del momento empiezan a impartir cursos optativos en la carrera de física, y dirigen tesis de licenciatura de estudiantes interesados que, una vez motivados para trabajar en el área, se los envía al extranjero para obtener maestrías y doctorados en instituciones líderes del área. La mayoría de estos estudiantes, una vez graduados, volvieron al país para engrosar principalmente la planta del Instituto de Astronomía de

* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

la UNAM, creado en 1967, y en menor medida la del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), el nuevo centro surgido en 1971 del Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla.

Este último fue el primer centro de investigación establecido fuera de la ciudad de México, iniciando con ello la descentralización de la investigación en astronomía, si bien los observatorios ya habían salido de la capital décadas antes⁽⁶⁾. En los años ochenta astrónomos recién doctorados en el extranjero se incorporan a la sede del IA-UNAM en Ensenada, Baja California, fundada originalmente para dar apoyo al nuevo OAN en la sierra de San Pedro Mártir. En los años noventa el INAOE fortalece su planta con investigadores jóvenes y destacados, en parte atraídos por el proyecto del Gran Telescopio Milimétrico y por el Programa Internacional de Astrofísica Avanzada *Guillermo Haro* de talleres de trabajo y conferencias anuales. La UNAM sigue su proceso de descentralización al crear en 1996 la Unidad Morelia del IA, a la que se trasladan algunos de sus investigadores de gran trayectoria desde el Distrito Federal. En 2003, esta unidad se convierte en el Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (CRYA-UNAM). Otros grupos de astrónomos también se asentaron en provincia en esta época, especialmente en Guanajuato, Jalisco y Sonora.

El número de astrónomos nacionales ha crecido a lo largo de la historia a un ritmo lento pero decidido, y desde principios de los años noventa este crecimiento tiene un comportamiento lineal de unos 8 investigadores por año empleados en el país, bien en contratos de tiempo extendido (en general investigadores o profesores de planta) o temporales (contratados por tiempo y obra e investigadores postdoctorales). Las nuevas generaciones de astrónomos las engrosan, principalmente, los egresados de los postgrados de astronomía de México, una buena parte de los cuales han sido repatriados después de realizar estancias postdoctorales en el extranjero, y como en los comienzos, también doctores mexicanos formados en el extranjero. Desde 1989 existe la posibilidad de realizar estudios de posgrado en astronomía en México. Alrededor de los años noventa, además, la astronomía mexicana empezó a atraer a doctores extranjeros para que pudieran integrarse en la comunidad nacional y, con ello, aunar fuerzas en la formación de recursos humanos y en la investigación de frontera realizada en el país⁽¹⁾.

SITUACIÓN ACTUAL

Distribución geográfica

El padrón 2013 incluye 234 investigadores-astrónomos adscritos a alguna institución académica de nivel superior mexicana, que trabajan en las disciplinas de astronomía, astrofísica o instrumentación astronómica, de los cuales 96% son doctores, 3% maestros en ciencia, y 1% licenciados o ingenieros. En el censo de investigadores-astrónomos se han incluido los miembros del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) con líneas de investigación en estas disciplinas, los declarados en las plantas de institutos, centros de investigación o departamentos universitarios de astronomía, los astrónomos doctores graduados en México en los últimos años que se dedican a labores académicas en centros nacionales de enseñanza superior, y otros listados en el padrón de la Unión Astronómica Internacional o en los Congresos Nacionales de Astronomía, siempre que en los últimos 10 años hayan publicado algún resultado de investigación en revistas indexadas del área y no manifiesten que su actividad principal sea otra que la astronomía.

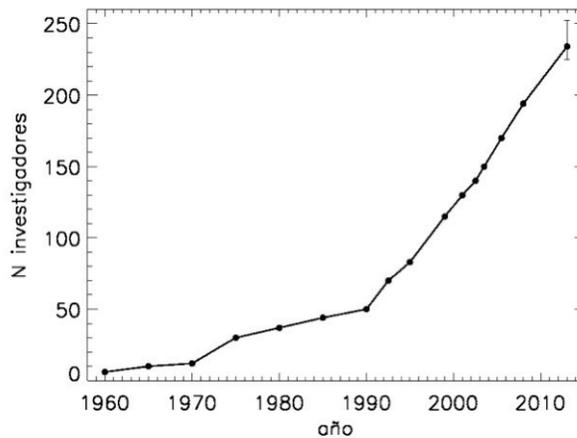


Figura 1: Crecimiento del número de investigadores de astronomía en México (figura adaptada de Peimbert y Rodríguez^(?), y Aretxaga^(?), actualizada a 1 de abril de 2013). La barra de error de 2013 corresponde a diferentes clasificaciones de los investigadores nacionales: cota inferior sin investigadores de disciplinas fronterizas, cota superior con los miembros del SNI en el extranjero.

Adicionalmente, las listas del SNI contienen 18 investigadores nacionales en estas disciplinas que trabajan fuera del país, principalmente en posiciones postdoctorales. Además de estos investigadores, hay alrededor de una veintena de científicos registrados en las áreas de física, química, biología y geología del SNI que también realizan investigación relacionada con la astronomía, y que no se han incluido en el padrón.

La figura 2 muestra la distribución de los investigadores-astrónomos por estado y nivel del SNI. Los astrónomos se concentran principalmente en dos centros de la Universidad Nacional Autónoma de México, el IA-UNAM con sedes en el Distrito Federal y en Baja California, y el CRYA-UNAM en Michoacán; y en un centro Conacyt, el INAOE en Puebla. Cada uno de estos centros cuenta con entre unos 20 y 50 investigadores. Otros institutos de la Universidad Nacional Autónoma de México (Ciencias Nucleares y Geofísica, en especial) también cuentan con grupos de hasta 10 personas. Además las Universidades de Guanajuato, Guadalajara y Sonora tienen departamentos o grupos consolidados de astronomía de entre 15 y 5 investigadores. En el último quinquenio se han establecido grupos de unos 5 investigadores-astrónomos en el Instituto Politécnico Nacional y en la Universidad Nacional Autónoma de Nuevo León. Otras universidades nacionales cuentan también con pequeños grupos de astrónomos dentro de sus departamentos o institutos de ciencias físicas, y 13% de astrónomos tienen posiciones en universidades de forma individual.

El número de astrónomos profesionales en México es todavía muy pequeño por comparación con su población: aproximadamente 1 por cada 500 000 habitantes, a compararse con 1 por cada 50 000 en EU o 1 por cada 80 000 en España. Si bien la Ciudad de México cuenta con un importante porcentaje del total de investigadores (36%), la astronomía es una ciencia que se encuentra relativamente descentralizada. Incluso dentro del Distrito Federal, la tradicional concentración de astrónomos en el IA-UNAM se está diluyendo, al ser contratado un creciente número de astrónomos en otras dependencias de la Universidad Nacional Autónoma de México y otros institutos de investigación y centros de educación superior públicos y privados de la capital. Si definimos el índice de concentración estatal como el porcentaje de astrónomos adscritos a la institución con mayor número de

astrónomos del estado, encontramos 75% en el Distrito Federal tiene el índice de concentración estatal más bajo del país, de 75%. El restante 25% está repartido en 10 centros. Por comparación, en otros estados se encuentran índices de concentración 86 a 100%.

La distribución geográfica de los investigadores-astrónomos puede ser comparada con la de hace 5 años⁽⁷⁾. El resultado más llamativo es la salida de varios estados del padrón de investigadores-astrónomos (Veracruz, Yucatán) y la entrada de otros (Chiapas, Hidalgo, Querétaro, Tabasco), debido al efecto conjunto de nuevas contrataciones en nuevas universidades, y al abandono paulatino de la labor de investigación por los jóvenes investigadores más aislados. Otro dato a resaltar es el crecimiento de la población de investigadores del área en Jalisco y Nuevo León.

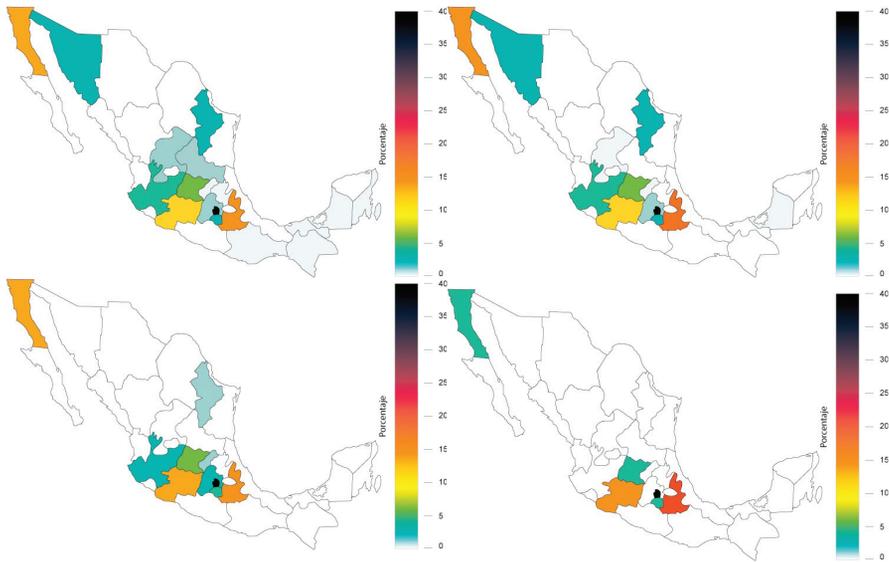


Figura 2: Distribución de los investigadores-astrónomos por estados (a): cuadro izquierdo superior, censo completo de 234 investigadores-astrónomos; (b) cuadro derecho superior, subgrupo de 191 miembros y candidatos del SNI; (c) cuadro izquierdo inferior, subgrupo de 97 miembros del SNI en los niveles II, III o emérito (E); (d) cuadro derecho inferior, subgrupo de 28 miembros del SNI en los niveles III o E.

*Distribución de reconocimiento dentro
del Sistema Nacional de Investigadores*

Al primero de abril de 2013, el porcentaje de miembros del SNI entre los astrónomos establecidos en México antes de 2011 es de 89% (191 miembros). Si contabilizamos además los astrónomos recién graduados, repatriados o en contratos postdoctorales temporales (postdocs) que se han incorporado en los últimos 2 años a la planta investigadora del país, y que, o bien se encuentran tramitando su incorporación al SNI, o se espera vuelvan a salir del país, el porcentaje de astrónomos miembros del SNI es de 83%. La mayoría de estos investigadores recientemente incorporados a la planta mexicana tienen un nivel equivalente a los SNI-C, I y II. Este factor corrector del porcentaje de miembros del SNI es claro especialmente en la Universidad Nacional Autónoma de México, que ha venido ejerciendo en los últimos años una ambiciosa política de contratación de postdocs nacionales y extranjeros, al estilo de los grandes centros de investigación internacionales.

La distribución de astrónomos miembros del SNI por estado y nivel de SNI puede visualizarse en la figura 2. Se aprecia que la descentralización de los miembros del SNI es comparable a la del total de astrónomos del país, si bien según se progresa en mayor dedicación y reconocimiento a la investigación, desde miembros y candidatos del SNI, a niveles consolidados (II+III), a los máximos niveles de reconocimiento (III, de ahora en adelante siempre incluirá a los eméritos), la concentración en el centro del país es cada vez mayor. Un 50% de los investigadores-astrónomos con niveles III se encuentran en el Distrito Federal. 96% de los niveles III, y 89% de los II+III se encuentran en algún centro de la Universidad Nacional Autónoma de México o en el INAOE.

SNI 2013

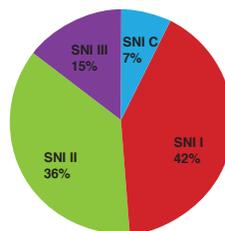


Figura 3: Distribución de niveles del SNI de los investigadores-astrónomos en México.

La figura 3 representa la división de los miembros del SNI en 4 categorías: C, I, II, III: 51% de los miembros del SNI tienen niveles II y III, que se consideran niveles consolidados. Aunque la planta de investigadores-astrónomos ha aumentado en los últimos 5 años, los niveles de reconocimiento nacionales son similares, y van en ligero aumento, según aumenta la edad promedio y experiencia de la población.

Distribución de género

De entre los 234 investigadores-astrónomos 52 son mujeres (22%), de las cuales, 73% son miembros o candidatas del SNI. Entre las investigadoras-astrónomas sin reconocimiento SNI hay un 53% que se graduaron hace más de 5 años, muchas de las cuales fueron miembros del SNI en el pasado, y el resto son investigadoras postdoctorales o recientemente graduadas. La proporción de abandono del SNI entre las mujeres es algo superior a la de los hombres (48%), dentro del periodo de 10 años desde la publicación del último resultado de investigación.

La proporción de mujeres entre los miembros del SNI es 20%, algo inferior al porcentaje de mujeres en el padrón 2013 (22%), y ambas proporciones son inferiores a 28% de nuevas licenciadas en física en los últimos 10 años^(8,9), la principal disciplina fuente de nuevas generaciones de investigadores del área. Todos los porcentajes están lejos de la equidad de género, pero se observa una proporción similar de mujeres en los niveles de candidato al SNI que en egreso de licenciatura, probablemente indicativo de que la progresión de la mujer en la etapa formativa hasta llegar a joven investigadora es adecuada.

El porcentaje de investigadoras era mayor en el pasado. De hecho se observa que un número considerable de investigadoras en la disciplina ocupan puestos de responsabilidad y decisión a nivel nacional e internacional, y se les reconoce su labor investigadora y formativa al más alto nivel: 29% de los SNI III son mujeres, una gran mayoría de las cuales se graduaron en los años ochenta.

Dejando a un lado el más alto nivel de reconocimiento del SNI, y que la proporción observada de mujeres en este nivel puede estar favorecida por

un mayor reclutamiento femenino en la disciplina en épocas anteriores, el porcentaje de mujeres en el resto de niveles sigue una preocupante tendencia descendiente según el nivel de competencia y reconocimiento en investigación aumenta, como se puede apreciar en la figura 4. Aunque estamos ante estadísticas de números pequeños, la proporción de investigadoras nivel II es significativamente más pequeña que lo esperado ante una progresión de carrera y captación de nuevos valores pareja a lo largo del tiempo. El motivo de este descenso en la proporción de mujeres por nivel de reconocimiento a la investigación no tiene una explicación obvia. Sin embargo, esta tendencia de decremento de la población femenina según se consideran niveles de competencia y reconocimientos más altos en investigación es algo observado en otras comunidades científicas mexicanas⁽¹⁰⁾ y en las de otras sociedades que culturalmente se consideran cercanas⁽¹¹⁾.

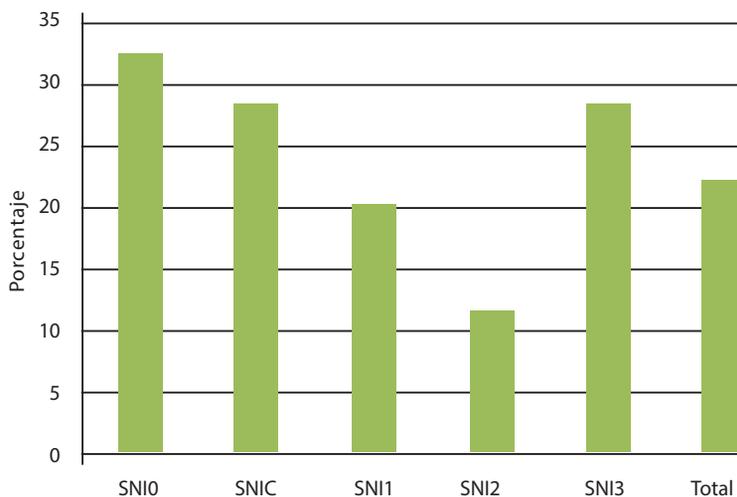


Figura 4: Proporción de mujeres entre los investigadores-astrónomos de diferentes niveles de reconocimiento SNI: SNI0 sin nombramiento SNI, SNIC candidatos, SNI1 miembros del SNI nivel I, SNI2 miembros del SNI nivel II, SNI3 miembros del SNI niveles III y eméritos. La última columna representa el porcentaje total. Porcentaje se define como $Mujeres / (Mujeres + Hombres) \times 100$ en cada nivel.

Distribución de las líneas y métodos de investigación

Los astrónomos en México realizan tanto trabajo observacional como teórico, cubriendo todo el espectro electromagnético, desde las ondas radio hasta los rayos gamma y cósmicos. Los astrónomos teóricos del país utilizan tanto técnicas analíticas como computacionales. Los intereses científicos de la comunidad son comprensivos, y abarcan las ciencias planetarias y exoplanetarias, la astronomía estelar y solar, los medios difusos (circunestelar, interestelar, interplanetario, intergaláctico), la astrofísica galáctica y extragaláctica, la cosmología y la instrumentación astronómica, principalmente. La figura 5 representa el porcentaje de investigadores que trabaja por subdisciplina y tecnicas empleadas. Se incluyen los temas de sistemas planetarios, la astronomía estelar y solar, medios difusos, astronomía galáctica y extragaláctica, cosmología, instrumentación y otras áreas, como la arqueoastronomía o la caracterización de sitios astronómicos. Le siguen los porcentajes de investigadores que realizan investigaciones a través de desarrollo de teorías o de modelado, y aquellos que se basan en observaciones en ondas radio a milimétricas, en longitudes de ondas infrarrojas, visibles o ultravioletas, y en rayos-X, gamma o cósmicos. Se hace notar que un mismo investigador puede contabilizarse en varias de estas categorías.

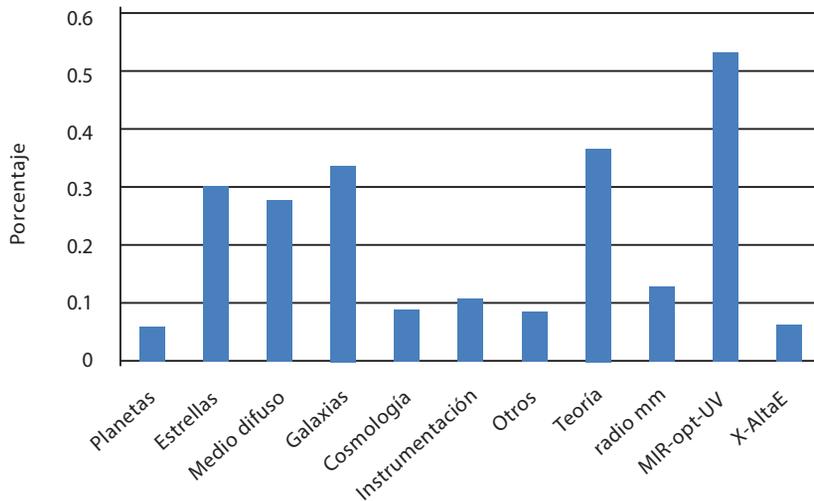


Figura 5. Porcentaje de investigadores nacionales que trabajan en las subdisciplinas indicadas.

Las subdisciplinas más practicadas por la comunidad nacional son la astronomía estelar y los estudios de galaxias y medios difusos, con porcentajes de alrededor de 30% de investigadores cada una. El porcentaje de dedicación a astronomía estelar está en sintonía con los porcentajes de países europeos, que presentaban entre 22 y 42% de interés por esta área a principios del milenio⁽⁷⁾. Astrofísica extragaláctica está de 17 a 22% por encima del promedio europeo. 8% de dedicación a sistemas planetarios en México es ligeramente inferior al referente europeo, de 10-18%. En cuanto a técnicas de investigación, 37% de los astrónomos nacionales realizan trabajo predominantemente teórico y de modelado, a compararse con 34 a 54% europeo. Las longitudes de onda de más uso por los astrónomos nacionales son las del intervalo infrarrojo cercano-óptico-ultravioleta, con 54% de usuarios, a compararse con 33 y 52% en el Reino Unido y España. El intervalo radio-mm, en fuerte expansión en todo el mundo, cuenta en México con tan solo 13% de usuarios, porcentaje incluso inferior al porcentaje europeo de 19 y 21% en España y el Reino Unido a principios del milenio. Estos países han incrementado el número de usuarios de estas frecuencias en el seno de sus propias comunidades desde entonces, gracias a nueva tecnología disponible en sus telescopios de acceso nacional.

La distribución por subdisciplinas no ha sufrido una fuerte evolución en el último quinquenio⁽⁷⁾. Hay investigadores con niveles II y III del SNI en todo el espectro de subdisciplinas practicadas en México.

PERSPECTIVAS DE FUTURO

Con tan solo 1 investigador-astrónomo por cada 500 000 habitantes, México tiene un gran potencial de crecimiento científico hasta alcanzar las cotas de densidad de investigadores de los países más desarrollados del hemisferio Norte. En los últimos años el mayor crecimiento ha estado asociado a la implantación de nuevos investigadores en nuevos centros de investigación sin trayectoria previa en astronomía, o en el crecimiento de grupos establecidos de pequeño tamaño, especialmente en provincia, además de las posiciones postdoctorales de los grandes centros de astronomía. A lo largo

de una década^(12,7) se ha observado que la implantación de jóvenes investigadores de forma individual en departamentos de física o ingeniería les ha llevado, en una gran proporción, al abandono de la investigación a mediano o largo plazo. Los grupos pequeños con algún elemento consolidado, o cerca de instituciones potentes en investigación, tienden a florecer y conseguir una estabilidad en sus carreras investigadoras. El modelo de creación de plazas en donde se garantiza algún profesor investigador de nivel consolidado deber ser favorecido para preservar e incentivar las carreras investigadoras del grupo. Las universidades de Guanajuato y Guadalajara son claros ejemplos de este exitoso modelo.

Se debe estudiar qué medidas o incentivos se pueden establecer para mejorar la progresión de las carreras de los investigadores en provincia que se encuentran alejados de los grandes centros de astronomía. La descentralización no solo se debe considerar en número de investigadores, sino también en la calidad de la investigación que se realiza en los estados, especialmente en los estados más periféricos.

Asimismo, se observa que aunque hay un número sustancial de investigadoras de gran trayectoria, reconocidas y ejerciendo puestos de responsabilidad, la progresión de las carreras de las investigadoras más jóvenes no parece ser tan exitosa como las de sus antedecesoras y/o ha habido una caída en reclutamiento femenino o mayor abandono de la investigación en este colectivo. Es demasiado precipitado extraer una conclusión sobre las causas, bien sean condicionamientos generacionales, culturales ante una mayor presión y competencia, o un cambio de paradigma sujeto a esquemas y sesgos⁽¹³⁾. En cualquier caso, el descenso del número de investigadoras hasta 22%, 20% en el SNI, es preocupante y el retroceso debe ser estudiado en detalle para identificar las causas e incentivar el liderazgo de las investigadoras que garantizarán el relevo generacional a largo plazo.

Con tan solo 13% de investigadores trabajando en longitudes de onda radio-milimétricas en México, esta área observacional debe expandirse fuertemente en el futuro si se quiere aprovechar al máximo la nueva infraestructura disponible para la comunidad nacional.

REFERENCIAS

1. Rodríguez L.F., 2000, en “Las Ciencias Exactas en México”, A. Menchaca (Coord.), Colección Biblioteca Mexicana, Fondo de Cultura Económica, México:
“*La astronomía en México: El pasado reciente y los retos de futuro*”.
2. Peimbert M. y Rodríguez L.F., 2008, en la “Enciclopedia de las Ciencias en México”, Carlos Herrero (ed.), Universidad Autónoma Metropolitana, México: “*Astronomía*”
3. Ávila N., Galindo Trejo J., Moreno Corral M.A. y Podeva Ricalde A. “*Breve historia de la astronomía en México*”, Universidad Nacional Autónoma de México.
4. Pişmiş P. y Cruz-González G., 1998, “*Reminissenses in the life of Paris Pişmiş: a woman astronomer*”, Universidad Nacional Autónoma de México.
5. Bartolucci, J., 2000, “*La modernización de la ciencia en México. El caso de los astrónomos*”, Universidad Nacional Autónoma de México.
6. Poveda A., 1995, en “Retos y perspectivas de la ciencia en México”, Academia Mexicana de Ciencias: “*Con los pies en la tierra y la cabeza en el cielo: algunas enseñanzas derivadas del desarrollo de la astronomía en México*”
7. Aretxaga I., 2008, en “Science in Mexico 2008: Present State and Perspectives”, J.P. Lacleite (Ed.), Academia Mexicana de Ciencias: “*The state of astronomy in Mexico*” (disponible en http://centeotl.inaoep.mx/~itziar/papers/AMC_Astronomy08.pdf)
8. “*Anuario Estadístico 2004: Población Escolar de Licenciatura y Técnico Superior en Universidades e Institutos Tecnológicos*”, Asociación Nacional de Universidades e Institutos de Educación Superior, México.
9. Del Valle Diaz Muñoz G. y de Garay Sánchez A., 2012, *Ciencia*, 63 (num. 3), 24: “*La falta de inclusión de mujeres en las ciencias exactas e ingenierías*”
10. Saabedra Barrera P., 2012, *Ciencia*, 63 (num. 3), 44: “*Mujeres matemáticas en México*”
11. I. Sánchez de Madariaga, S. de la Rica y J.J. Dolado (Ed.), 2011, “*Libro Blanco. Situación de las Mujeres en la Ciencia Española*”, Ministerio de Ciencia e Innovación, España.
12. Lizano S., 2003, en “Estado actual y prospectiva de la ciencia en México”, Academia Mexicana de Ciencias.
13. Urry M., 2008, *JENAM: “Women in Astronomy*” (disponible en http://www.astro.rug.nl/~kamp/JENAM_Urry_rev.pdf)

LA COMUNIDAD ASTRONÓMICA MEXICANA Y SU IMPACTO EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL, Y LA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

*Manuel Peimbert**

INTRODUCCIÓN

Si queremos que la investigación básica en astronomía tenga un impacto en la sociedad mexicana, de tal manera importante, que sea significativo en el desarrollo cultural del país y en la elevación de la calidad de la enseñanza, requerimos que el número de investigadores en el ramo alcance una masa crítica de alrededor de 20 astrónomos por millón de habitantes.

México tiene 116 millones de habitantes, entonces estamos hablando de alcanzar una meta de más de 2 300 astrónomos profesionales con el grado de doctor. En la actualidad contamos con alrededor de 230 astrónomos profesionales, una cantidad diez veces menor, 2 por millón de habitantes. El número de astrónomos por millón de habitantes en Estados Unidos es de alrededor de 25 y en España es alrededor de 12.

Para avanzar significativamente en este problema requerimos aumentar a mediano plazo, digamos seis años, el gasto en ciencia y tecnología de 0.3% del producto interno bruto (PIB) a 1%. Algunas fuentes dicen que estamos cerca de 0.4% del PIB.

¿Qué ha pasado desde 1972 en que existen mediciones de este número? Que en 40 años el gasto en ciencia y tecnología se ha mantenido entre 0.3% y 0.4% del PIB. Éste ha aumentado significativamente en estos cuarenta

* Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

años pero la fracción del PIB dedicada a ciencia y tecnología se ha mantenido constante.

Cuando asumieron el poder los presidentes Carlos Salinas, Ernesto Zedillo y Vicente Fox prometieron aumentar el gasto en ciencia y tecnología de 0.3% al uno por ciento, estas promesas no se cumplieron. Ahora el presidente Peña Nieto ha hecho la misma promesa, ojalá al término de su sexenio esta promesa se haya cumplido.

Los países desarrollados dedican entre 1% y 3% de su PIB a el gasto en ciencia y tecnología; Estados Unidos dedica 2.7%.

LA COMUNIDAD ASTRONÓMICA MEXICANA Y SU IMPACTO EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL

Llamaré comunidad astronómica mexicana o simplemente astrónomos mexicanos, a los astrónomos que trabajan en México. La comunidad astronómica mexicana incluye un poco más de 20% de astrónomos que nacieron en otro país. Más de 70 por ciento de los astrónomos mexicanos se doctoraron en el extranjero, la mayoría en Estados Unidos e Inglaterra, y algunos más en Francia, Alemania, España y otros países de Europa.

En la actualidad hay varias instituciones mexicanas que otorgan el doctorado en astronomía, las dos principales son la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE).

Los astrónomos mexicanos durante su doctorado y también después, establecen lazos de colaboración con astrónomos de otros países que mantienen durante toda su carrera. Los estudios de doctorado en el extranjero y la relación con investigadores de otros países han permitido que la astronomía en México se haya desarrollado adecuadamente sin los efectos nocivos de la endogamia.

La calidad de los astrónomos mexicanos es similar a la de nuestros colegas de otros países. Esta afirmación se puede medir de distintas maneras. Mencionaré cinco: a) el número de citas que obtiene a sus trabajos de investigación un astrónomo mexicano representativo es similar a las citas que

obtiene un astrónomo representativo de otros países, b) la contribución y responsabilidad de los astrónomos mexicanos en los artículos elaborados con astrónomos de otros países es similar a la de los miembros de otros países, c) la representación de astrónomos mexicanos en organismos científicos internacionales como la Unión Astronómica Internacional y en la organización de coloquios y simposios internacionales también es similar a la de los astrónomos de otros países, d) los astrónomos mexicanos han obtenido distinciones astronómicas internacionales, tales como medallas académicas y otros premios, y e) los astrónomos mexicanos participan también en comités encargados de otorgar tiempo de telescopio en los observatorios nacionales de Estados Unidos, como el Observatorio Nacional de *Kitt Peak*, o internacionales como el Observatorio Internacional de Cerro Tololo en Chile y el *Hubble Space Telescope*.

Las tres principales revistas del mundo en astronomía son: el *Astrophysical Journal*, el *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, y *Astronomy and Astrophysics*. Las dos primeras empezaron como revistas de la *American Astronomical Society*, de Estados Unidos, y de la tercera del *Royal Astronomical Society* de Inglaterra que empezó como una revista europea. Ahora las tres se han vuelto, en gran medida, revistas internacionales donde publican astrónomos de todas partes del mundo. Los astrónomos mexicanos publicamos en las tres revistas mencionadas. Las tres revistas someten los artículos propuestos por los autores a arbitrajes rigurosos por expertos mundiales en el tema del artículo. Una fracción considerable de los artículos de la comunidad mexicana es publicada en estas tres revistas. Además, los astrónomos mexicanos somos requeridos por ellas para arbitrar artículos de astrónomos de todas partes del mundo.

Desde 1974 publicamos la *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* en inglés, idioma que se ha convertido en lo que era el latín en la edad media, que es la lengua franca de los científicos de todos los países del mundo. Los artículos de nuestra revista también son arbitrados por expertos mundiales y además publica artículos de astrónomos de todas partes del mundo. Nuestra revista también se utiliza para publicar las contribuciones presentadas en simposios internacionales, principalmente aquellos que se llevan a cabo en Latinoamérica.

FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS Y DISCUSIÓN

La formación de recursos humanos involucra a los astrónomos mexicanos en diversos aspectos educativos, se inicia con la divulgación de la astronomía, y continúa con estudios de licenciatura, maestría, y doctorado. Los estudios se combinan con la investigación, que empieza desde la licenciatura y continúa en la maestría, el doctorado, el postdoctorado, e inclusive con los trabajos realizados conjuntamente por grupos formados por investigadores jóvenes e investigadores más maduros.

Uno de los elementos necesarios para realizar investigación de frontera incluye la obtención de datos observacionales de alta calidad. Tenemos la fortuna de contar con uno de los sitios más propicios del hemisferio norte, si no es que el mejor, para hacer observaciones en el óptico y el infrarrojo, me refiero al observatorio de San Pedro Mártir en Baja California. Desafortunadamente el telescopio principal en ese observatorio se inauguró en el lejano 1979 y es relativamente pequeño, el espejo principal tiene 2.1 metros de diámetro. Requerimos de un telescopio moderno con un espejo más grande para avanzar en el conocimiento del universo y desarrollar la ciencia básica de nuestro país.

¿Por qué los países desarrollados dedican un porcentaje alto de su PIB a la ciencia y la tecnología y los países subdesarrollados un porcentaje bajo? Porque los países desarrollados saben que el gasto en ciencia y tecnología permite un desarrollo económico mayor. Además tienen claro que trae otros beneficios, como un sistema educativo de mayor calidad y una cultura científica tecnológica necesaria para tener el apoyo de la población para los planes de desarrollo de esos países.

En los países desarrollados se conocen las cuatro premisas siguientes: a) todas las ciencias básicas están relacionadas entre sí y el avance de una de ellas propicia el desarrollo de todas las demás, b) las ciencias básicas están relacionadas con las ciencias aplicadas y el desarrollo de las ciencias básicas lleva al desarrollo de las ciencias aplicadas, c) las ciencias aplicadas están íntimamente ligadas con la tecnología y el desarrollo de las ciencias aplicadas lleva al desarrollo de la tecnología, y d) el desarrollo de la tecnología lleva como consecuencia el desarrollo de la economía.

Daré el ejemplo de la óptica en México. La óptica tiene aspectos de ciencia básica, ciencia aplicada, y tecnología. El desarrollo de la investigación en óptica surgió en los años sesenta en el Instituto de Astronomía de la UNAM por la necesidad de los astrónomos de contar con instrumentos para observar el cielo. En la actualidad hay más de 200 doctores en óptica en el país y se puede trazar su árbol genealógico al conjunto de ópticos que empezaron su carrera en el Instituto de Astronomía.

En resumen, la calidad de los astrónomos mexicanos es similar a la calidad de los astrónomos de los países desarrollados, pero el impacto de la actividad astronómica en nuestra sociedad ha sido mucho menor debido al reducido número de astrónomos mexicanos por millón de habitantes en comparación con el número de astrónomos por millón de habitantes de los países desarrollados. Y como mencioné anteriormente el desarrollo de la astronomía, así como el de las otras ciencias básicas, es necesario para el desarrollo cultural, educativo, tecnológico, económico y social del país.

PROPUESTAS

Basado en la discusión anterior enlisto algunas de las acciones que debe seguir desarrollando y ampliando el país.

Expandir el sistema de estudiantes de doctorado en ciencias básicas, aumentando la calidad y el número de estos.

- a) Propiciar que una fracción considerable de los estudiantes mexicanos lleven estudios de doctorado en las mejores universidades del mundo. Las razones principales son dos: tener investigadores mexicanos actualizados en la frontera del conocimiento y evitar la endogamia.
- b) Generar plazas en México para los mexicanos que se doctoran en el extranjero.
- c) Establecer un equilibrio entre los mexicanos con doctorado que por diversas razones se quedan en el extranjero y los doctores extranjeros que por diversas razones deciden establecerse en México.

- d) Establecer grupos de investigadores con doctorado que realizan investigación en todas las universidades mexicanas de primer nivel, ya que es la única manera de propiciar la enseñanza de alta calidad y la posibilidad de que las universidades mexicanas puedan ofrecer el grado de doctor con la calidad que el grado requiere.
- h) Establecer intercambios de estudiantes de posgrado entre nuestras universidades y las mejores del mundo por periodos del orden de un semestre. Esta acción permitiría a los estudiantes mexicanos calibrarse con los extranjeros y aprender de ellos.
- i) Establecer programas de intercambio de investigadores con doctorado con investigadores de las mejores universidades del mundo. Esta acción permitiría a los investigadores mexicanos realizar investigaciones conjuntas con científicos de otros países.
- j) Propiciar la relación entre la investigación en ciencias básicas y la instrumentación de frontera en óptica, electrónica, cómputo y nanotecnología, así como con otras áreas que también estén relacionadas con el desarrollo tecnológico del país.

EL PRESENTE Y EL FUTURO DE LA RADIOASTRONOMÍA EN LA UNAM

*Luis Felipe Rodríguez Jorge**

ANTECEDENTES

Fue en el estado de Puebla donde a mediados del siglo xx se dio una etapa dorada en la astronomía mexicana. Guillermo Haro y sus colaboradores utilizaron provechosamente el telescopio tipo cámara *Schmidt* del Observatorio de Tonantzintla para hacer varios descubrimientos que pusieron muy en alto el prestigio de la astronomía mexicana a nivel mundial. Pero al mismo tiempo que esto sucedía en México, en los países más desarrollados ocurría una profunda revolución en la astronomía. Hasta esas épocas prácticamente toda la astronomía se había realizado mediante el estudio de la luz que nos llega de los astros. Se comenzó entonces a estudiar al universo también en ondas de radio y en las otras ventanas del espectro electromagnético, que los astrónomos dividimos en: radio, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Esta revolución pasó relativamente desapercibida en México. El estudio del universo en estas ventanas, hasta entonces inexploradas, del espectro electromagnético llevó a descubrimientos de nuevos cuerpos y fenómenos cósmicos, como los pulsares, la radiación cósmica de fondo y las binarias de rayos X, descubrimientos que serían reconocidos con varios premios nobel de física.

No fue sino hasta alrededor de 1980 cuando regresaron a México los primeros radioastrónomos que se habían formado en el extranjero. El panorama

* Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

era difícil para ellos: la comunidad astronómica mexicana trabajaba predominantemente en el visible y sonaba lógico que los pocos recursos disponibles se continuaran gastando en esta rama de la astronomía. Algunos intentos de construir un radiotelescopio en México fueron recibidos sin entusiasmo, por no decir que con hostilidad. En esos días se planteó la posibilidad de que uno de los diez radiotelescopios que integrarían el VLBA (*Very Long Baseline Array*) estuviera en territorio mexicano, pero aún esta iniciativa, relativamente modesta, se comparaba en costo con el de un telescopio óptico de tamaño mediano, como el 2.1 m ya existente en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, en Baja California. El VLBA es un proyecto a cargo del NRAO de EU (*National Radio Astronomy Observatory*) que fue inaugurado en 1993 y, desde entonces, ha funcionado exitosamente (véase figura 1). Como veremos, el VLBA volvería a cruzarse de manera importante con la radioastronomía mexicana.

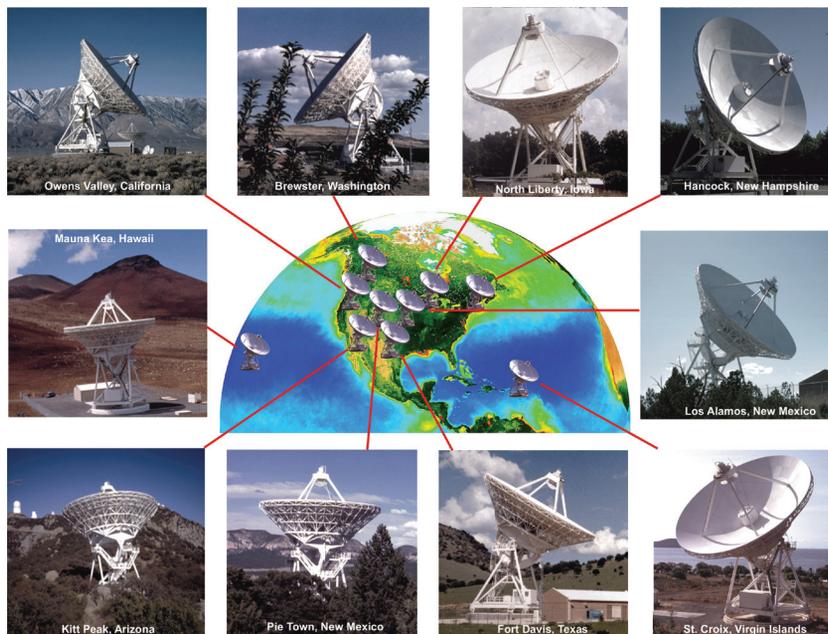


Foto: Cortesía de NRAO.

Figura 1: El interferómetro de línea de base muy larga (VLBA) está constituido por diez radiotelescopios distribuidos en el hemisferio Norte.

UNA ESTRATEGIA DE SOBREVIVENCIA

La situación de escasos recursos reinante en la década de 1980 llevó a que la pequeña comunidad de radioastrónomos mexicanos adoptara como estrategia el realizar sus observaciones en radiotelescopios de otros países, en particular los que son propiedad de NRAO. Esta institución ha logrado mantener una política de “cielos abiertos”, que en breve quiere decir que aceptan y asignan tiempo de telescopio a proyectos de otros países, siempre y cuando estos sean evaluados como de alta calidad. Esta estrategia de observación, aunada a la colaboración con un grupo de astrónomos teóricos que interpretaban los datos de radio, permitió la supervivencia y progresivamente la consolidación de la radioastronomía en México.

Un radiotelescopio que los astrónomos mexicanos han utilizado exhaustivamente es el VLA (*Very Long Array*) que se muestra en la figura 2. Inaugurado en 1980, los radioastrónomos mexicanos utilizan del orden de 3% del tiempo de observación para una variedad de investigaciones. Cuando se comenzó a plantear la modernización del instrumento, los radioastrónomos mexicanos fueron los primeros en aportar recursos para ello. Esta se completó en 2012 con el nombre del *Expanded VLA* (EVLA) a un costo de 56 millones de dólares, 2 de los cuales la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) aportó a través de un proyecto en el programa de Campos Emergentes del Conacyt.

Desde un punto de vista pragmático, la radioastronomía en la UNAM es una historia de éxito. A un costo muy modesto, publica alrededor de 30 artículos anuales que agrupados a través del tiempo reciben del orden de 2500 referencias anuales en la literatura internacional. Se han hecho aportaciones fundamentales al estudio de la formación estelar, de los llamados micro cuasares, de las estrellas evolucionadas y de la determinación de distancias ultra precisas a estrellas jóvenes. Esta última área de investigación se realiza en el VLBA, un proyecto que tiene asignadas 5000 horas de observación y que está a cargo del doctor Laurent Loinard, del Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM.



Foto: Kelly Gatlin; composición digital: Patricia Smiley. Cortesía NRAO/AUI.

Figura 2: Algunos de los radiotelescopios que forman el arreglo muy grande (VLA) ubicado en el estado de Nuevo México, en el sur de Estados Unidos.

El enfoque seguido por la UNAM tiene como puntos favorables que se logran resultados de relevancia a un costo muy reducido y que se tiene en el Centro de Radioastronomía y Astrofísica en el Campus Morelia un grupo de competencia internacional. Por otro lado, este enfoque puede ser criticado porque no se ha logrado una vinculación con la tecnología y la industria nacionales, en particular dado que la radioastronomía tiene fuerte relación con las telecomunicaciones y la electrónica, que no se ha aprovechado en México.

El siguiente proyecto en el que se involucró la Universidad Nacional Autónoma de México con el NRAO fue la participación en el Gran Arreglo Milimétrico de Atacama (véase figura 3). Este es el proyecto de radioastronomía más ambicioso jamás planteado. A un costo de 1400 millones de dólares se construye en el desierto de Atacama en Chile, a 5000 metros de altura. En él participan EU, Europa (a través del *European Southern Observatory*), Japón y Taiwán. Gracias a la colaboración con NRAO, los radioastrónomos mexicanos han comenzado a utilizar ALMA y han sido de los primeros grupos a nivel mundial en concretar varias publicaciones.

De manera paralela a los proyectos de la UNAM anteriormente descritos, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) inició una colaboración con la Universidad de Massachusetts para construir el radiotelescopio para ondas milimétricas más grande del mundo. Este proyecto se conoce como el Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano* (GTM). En otra contribución de estas memorias, David Hughes nos describe la historia y estatus actual de este proyecto, el más grande en el que se ha embarcado la ciencia mexicana en cualquiera de sus áreas.



Foto: W. Garnier. Cortesía de ESO/NAOJ/NRAO.

Figura 3: Los primeros radiotelescopios del gran arreglo milimétrico de Atacama (ALMA) ubicado en el Norte de Chile.

De este modo, la radioastronomía en México enfrenta una situación con grandes expectativas. Por un lado existe el acceso competitivo a los grandes radiotelescopios en los que está involucrado el NRAO y por el otro se cuenta con un gran instrumento en el país. Queda pues a la competencia de la pequeña comunidad de radioastrónomos radicados en México el sacar el mejor partido a esta situación.

EL FUTURO DE LA RADIOASTRONOMÍA EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

¿Cuáles son los retos y perspectivas de la radioastronomía en la Universidad Nacional Autónoma de México? A corto plazo enfrenta la transmisión y reducción de los grandes volúmenes de datos que generan los interferómetros de nueva generación, EVLA y ALMA, principalmente. Esto se está resolviendo parcialmente con una mejora en las conexiones de internet con las que cuenta la UNAM de México y con la adquisición, de nuevo gracias al apoyo del Conacyt, de una computadora de alto desempeño, en particular equipada con discos de gran volumen y con alta velocidad de lectura y escritura, utilizando el sistema de archivos distribuidos LUSTRE.

A mediano plazo se busca ampliar la planta de radioastrónomos de los cuatro que hay actualmente a diez. Como anteriormente, este personal deberá ser de alta calidad y alta productividad. El aspecto prometedor de este requerimiento es que se cuenta con una generación de radioastrónomos mexicanos jóvenes concluyendo su formación tanto en México como en el extranjero. A esta escala de tiempo, la UNAM debe de plantearse y resolver si es provechoso tener una colaboración mas formal con el NRAO, quizá de índole similar a la que tienen los países que forman el Observatorio Austral Europeo (ESO). Es de destacar que Brasil, país similar a México, ha decidido formar parte de ESO para garantizar tiempo de telescopio para sus astrónomos.

A más largo plazo, del orden de una década, la radioastronomía en la universidad tiene que plantearse si toma un rol más proactivo en el desarrollo de algún futuro gran proyecto internacional. En la actualidad se plantea la construcción del Telescopio del Kilómetro Cuadrado (*Square Kilometer Array* o SKA) que tendrá instalaciones en Australia y Sudáfrica. Este proyecto tiene componentes de tecnología intermedia en los que México podría ser un proveedor importante. Sin embargo, para pretender una participación más amplia en proyectos de este tipo será necesario contar con una comunidad más grande de radioastrónomos competentes, del orden de 30 personas, que puedan aprovechar la gran inversión que esta colaboración implicaría. Además del grupo de la Universidad Nacional Autónoma de

México, existen núcleos importantes de radioastrónomos en el INAOE así como en la Universidad de Guanajuato. Una estrategia plausible es buscar la creación de grupos de radioastrónomos en las universidades estatales, los cuales podrían funcionar inicialmente como lo hizo el de la UNAM, esto es, contando con el conocimiento de los problemas relevantes y con equipo de cómputo para el análisis e interpretación de los datos.

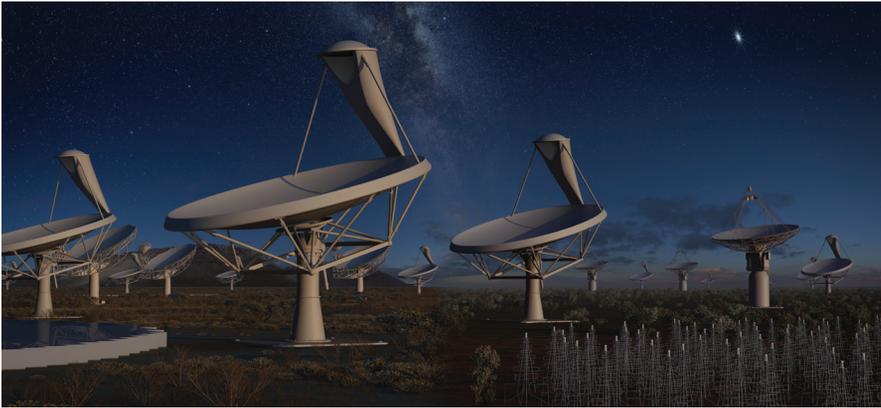


Foto: Cortesía de *SKA Organization*.

Figura 4: Representación artística del Telescopio kilómetro cuadrado SKA en funcionamiento en la noche.



LA ASTRONOMÍA MEXICANA EN COLABORACIONES INTERNACIONALES: LA PERSPECTIVA DE LA RADIOASTRONOMÍA

*Laurent Loinard**

La radioastronomía es la rama de la astronomía que se dedica al estudio del Universo mediante observaciones en longitudes de onda entre aproximadamente 0.5 milímetros y decenas de metros. Existe una larga tradición radioastronómica en nuestro país y, hoy en día, hay radioastrónomos en muchos centros de investigación mexicanos como la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y la Universidad de Guanajuato, por mencionar solo algunos. Por cierto, existe una institución, el Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, localizado en Morelia, Michoacán, que se enfoca precisamente a este tema.

La comunidad mexicana participa de manera directa en muchos de los grandes proyectos radioastronómicos internacionales.¹ Por ejemplo, mediante apoyos recibidos del Conacyt y la UNAM, participó en los desarrollos instrumentales que permitieron mejorar sustancialmente la sensibilidad del gran arreglo *Karl G. Jansky* (VLA por sus siglas en inglés; véase figura 1) y del arreglo de muy larga línea de base (VLBA). Dichas inversiones derivan en beneficios inmediatos para la astronomía en México. Quizás el más directo de ellos es la obtención, mediante un proceso competitivo, de tiempo de observación en los grandes radiotelescopios internacionales –tanto en aquellos, como el VLA o el VLBA, en los que se realizaron inversiones directas, como en otros telescopios, como el recién construido

* Centro de Radioastronomía y Astrofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

interferómetro sub-milimétrico ALMA (véase figura 2) localizado en el desierto de Atacama de Chile.



Foto: Cortesía de NRAO/AUI.

Figura 1. Gran arreglo Karl G. Jansky VLA ubicado en el estado de Nuevo México, en el sur de Estados Unidos.

El tiempo de observación conseguido se traduce, a su vez, en generación de conocimiento de frontera, en formación de recursos humanos de alto nivel, y en artículos publicados en revistas internacionales de prestigio: solamente en el periodo 2008-2012, la comunidad radioastronómica mexicana publicó más de 150 artículos arbitrados en revistas del mejor nivel. Un segundo producto de la participación mexicana en proyecto internacionales es la presencia de astrónomos nacionales en muchos comités internacionales –como las comisiones encargadas de la atribución de tiempo de observación, o de la planeación de futuros instrumentos o desarrollos tecnológicos–. Esto da mucha visibilidad a la comunidad mexicana en el contexto internacional. Finalmente, la presencia mexicana en proyectos internacionales propicia el intercambio de estudiantes e investigadores mediante estancias cortas o prolongadas. Son muchos los estudiantes mexicanos que obtuvieron su doctorado en co-accesoria con radioastrónomos en México y el extranjero, y los investigadores que realizaron estancias

posdoctorales o sabáticas en los mejores centros de radioastronomía del mundo. Esto favorece el (re)ingreso a instituciones mexicanas de investigadores que cuentan con una preparación del más alto nivel.

La participación de México en proyectos internacionales también fomenta desarrollos tecnológicos locales. Como ejemplo, cabe mencionar que la reducción y el análisis de los datos obtenidos con los grandes radiotelescopios actuales requieren recursos computacionales especializados importantes. El Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM en Morelia ya cuenta con la infraestructura necesaria, que desarrolló en colaboración con empresas locales, y que incluye el sistema de archivos distribuidos LUSTRE. La disponibilidad de estos recursos coloca a la comunidad radioastronómica mexicana en una posición privilegiada para aprovechar el flujo de datos que emane de los grandes proyectos internacionales, y no hubiera sido posible sin su participación estrecha en dichos proyectos.



Foto: W. Garnier. Cortesía de ESO/NAOJ/NRAO.

Figura 2: En septiembre de 2011, ALMA comenzó oficialmente sus operaciones. En esta foto, antenas multinacionales de la matriz se mueven como una sola.

El futuro de la radioastronomía en México es muy prometedor, ya que las condiciones existen para que la comunidad mexicana siga participando en proyectos internacionales de frontera. Esto debería acompañarse de un crecimiento en el número de radioastrónomos profesionales en México,

basado en la contratación de algunos de los estudiantes e investigadores jóvenes que se formaron justamente en el contexto internacional que describíamos anteriormente.

REFERENCIAS

1. De manera paralela a los proyectos que describiremos aquí, el INAOE inició una colaboración con la Universidad de Massachusetts para construir el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) en el estado de Puebla. Este es el más grande proyecto en el que se ha embarcado la ciencia mexicana en cualquiera de sus áreas, y se describirá en otra contribución de estas memorias.

CÓMO APROVECHAR NUESTROS RECURSOS NATURALES EN MATERIA DE ASTRONOMÍA PARA EL DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURA

*William Lee**

CONSIDERACIONES GENERALES PARA UN BUEN SITIO ASTRONÓMICO

Las características de un sitio para la observación astronómica se pueden dividir a grandes rasgos en dos categorías: las naturales, y las construidas, o de infraestructura básica de operación y científica.

Las de la primera categoría no se pueden fabricar, son condiciones naturales dadas: o se tienen o no se tienen. Entre las más importantes destacan: la altitud del sitio –a mayor altitud, menor es el trayecto que debe hacer la luz dentro de la atmósfera con la consecuente atenuación, pero por otro lado el costo de operación y mantenimiento es en general mayor en sitios más altos–; el número de noches despejadas al año; la humedad; la transparencia del cielo; la estabilidad de la atmósfera (que los astrónomos miden a través del llamado *seeing*). Sin embargo, algunas de ellas sí se pueden deteriorar por actividad humana –generación de polvo, o aumento del brillo del cielo por contaminación lumínica, por dar dos ejemplos–, y es necesario contar con mecanismos para proteger los sitios que ya de por sí las reúnen.

Las de la segunda clase sí se pueden fabricar, y resultan indispensables para que un sitio alcance su potencial y produzca los beneficios esperados. Entre las más importantes están: el acceso fácil para personas y equipo, el acceso al agua, la energía, las telecomunicaciones, la propia infraestructura

* Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

científica –telescopios e instrumentos–, y el estado y seguridad jurídica de los terrenos del sitio y colindantes.

SITIOS DE CALIDAD INTERNACIONAL EN EL MUNDO

Al tomar en cuenta todo lo anterior, México, a diferencia de la gran mayoría de los países, cuenta con al menos dos sitios que por sus características naturales son destacables para la astronomía: la Sierra de San Pedro Mártir, Baja California y la Sierra Negra, Puebla. Las particularidades de este último (4100 m sobre el nivel del mar) lo hacen excelente para las observaciones en el milimétrico, y en altas energías con ciertas técnicas, por lo que hoy alberga al Gran Telescopio Milimétrico (GTM) y al observatorio *High Altitude Water Čerenkov* (HAWC). Refiero la mayor parte de la discusión sobre Sierra Negra a las contribuciones de Alberto Carramiñana y David Hughes en esta publicación, y me concentraré aquí en San Pedro Mártir, dedicado a la astronomía óptico-infrarroja (OIR).

En el mundo hay solamente unos 4 sitios con características excepcionales para la astronomía OIR: el norte de Chile, Hawaii, las islas Canarias y el propio Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir, operado por la UNAM a través de su Instituto de Astronomía. Por lo mencionado anteriormente, estos lugares típicamente son remotos, de gran riqueza natural, y la mejor manera de protegerlos es desarrollarlos de manera responsable, conjuntando el interés de diversos sectores para un beneficio tangible para la población en general. Naturalmente, el recurso humano es igualmente importante para lograr aprovechar estas oportunidades, y sin ello no lograremos potenciar el desarrollo de la astronomía (o de cualquier otra disciplina).

Es muy claro que México está rezagado en cuanto al desarrollo cuando se compara la cifra de inversión acumulada en cada uno de estos sitios, el número de grandes telescopios instalados, y, de manera dramática, el número de países que participan en el sitio, es decir, si se considera como un auténtico laboratorio internacional de investigación. Dadas las inversiones requeridas para los proyectos, que han aumentado sin cesar en los últimos

40 años, no es de sorprender que sea necesario un apoyo multi-institucional, e incluso multi-nacional, para llevarlos a cabo. Los números se resumen en la tabla 1.

<i>Desarrollo de Observatorios en el mundo</i>				
	SPM	Canarias	Hawaii	Chile
Grandes telescopios ¹	1	6	6	15
Inversión total ²	30	3,500	7,000	8,000
Presupuesto anual ²	1	180	300	400
Países involucrados	1	16	15	25

¹Mayores a 2m en apertura

²En millones de dólares

Tabla 1.

SEGURIDAD JURÍDICA Y PROTECCIÓN DEL CIELO

En el tema del estado y seguridad jurídica, también hay diferencias entre los distintos sitios. En Chile, el gobierno otorgó estado diplomático al personal asociado a grandes proyectos, y tenencia de la tierra, a cambio de una fracción del tiempo disponible en la infraestructura instalada para la comunidad astronómica local. En Hawaii, Estados Unidos ha desarrollado los proyectos básicamente de manera autónoma, aunque con numerosas colaboraciones; y más recientemente el uso de la tierra se ha vuelto más complicado por derechos de poblaciones nativas y usos y costumbres. En España, parte de las instalaciones en el Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma se ubican dentro de un parque nacional, y deben por lo tanto respetar la legislación ambiental, lo cual no ha sido en detrimento del desarrollo de infraestructura.

En México, el sitio del Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir se encuentra dentro del Parque Nacional Sierra San Pedro Mártir,

que abarca aproximadamente 75 000 hectáreas. El Plan de Manejo del parque, de 2006 y publicado en el Diario Oficial de la Federación, establece que dentro del mismo hay una superficie de poco más de 3 000 hectáreas, la Zona de Preservación III, donde está permitido realizar investigación astronómica e instalar infraestructura científica para tal efecto. En 2012, la UNAM firmó un convenio con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) de la SEMARNAT que otorga al Observatorio el uso y disfrute de esta superficie para la investigación astronómica, dando así la seguridad jurídica requerida para grandes proyectos.



Foto: Craig Mayhew y Robert Simmon. Cortesía NASA/GSFC.

Figura 1. Contaminación lumínica. El brillo producido por la urbanización en el mundo entero limita la observación astronómica. San Pedro Mártir, B.C. es uno de los lugares más oscuros en el planeta apto para la instalación de infraestructura, y posiblemente el mejor del hemisferio Norte.

La legislación más antigua sobre la protección del cielo y contaminación lumínica (véase figura 1) se hizo en Tucson, Arizona en 1972, para cuidar los observatorios existentes y en desarrollo. Hoy en día es impresionante apreciar la diferencia que puede hacer un sistema de iluminación pública bien llevado, que además de preservar un cielo oscuro, hace un uso racional de la energía, y también tiene un efecto positivo en términos de limitar la perturbación ambiental para animales nocturnos y/o migratorios. Se han implementado reglamentos y leyes similares en las décadas

siguientes en Canarias (1988), Chile (1998), Hawaii (2003) y, más recientemente, en México. En 2006, el Municipio de Ensenada, B.C. aprobó el Reglamento para la prevención de la contaminación lumínica, que pasó a ser Ley Estatal en 2009. El Municipio de Mexicali (2011) cuenta también con su propia reglamentación a nivel municipal. Es importante destacar que el estado de Baja California es pionero en el país en regulación de este tipo, y es el único que a la fecha la tiene.

A nivel colegiado internacional, la protección del cielo resulta un punto tan importante que la Unión Astronómica Internacional cuenta con una división (la número 50) específicamente dedicada a la protección de sitios existentes y posibles a nivel mundial. Una mirada a un mapa mundial nocturno hace ver rápidamente que los cielos oscuros son un patrimonio en grave peligro en muchos países. Nuevamente, en México tenemos grandes regiones, principalmente en el norte del país, donde aún es posible contemplar el cielo como se veía hace miles de años en todo el mundo, y resulta relevante impulsar su preservación no solo en los lugares donde se pueden colocar telescopios, sino más generalmente para beneficio de todos.

Todo lo anterior incide directamente en la protección para la inversión realizada, por México y por sus socios, en infraestructura científica. Por lo mismo, es un factor que puede ayudar a atraer recursos adicionales y colaboraciones de países que puedan disponer de recursos económicos y busquen un lugar donde tengan el mejor rendimiento posible, en términos científicos, de desarrollo tecnológico y de recursos humanos.

INFRAESTRUCTURA BÁSICA: ACCESO, ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES

El acceso al sitio del OAN-San Pedro Mártir es, en primera instancia, por la carretera transpeninsular de Baja California por 100km hacia el sur de Ensenada, y en segundo lugar por una carretera secundaria que ingresa a la sierra otros 100km. El camino fue pavimentado, concluyéndose por completo por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y el Estado de B.C. en 2009, haciendo el acceso al sitio sencillo y seguro.

En lo que se refiere a energía, el Observatorio funciona al día de hoy con plantas generadoras de diesel, con una capacidad acumulada de aproximadamente 300kW. Ello implica transportar el diesel periódicamente, y adquirir y mantener las plantas, que incluyen suministro de emergencia. La energía es evidentemente para hacer funcionar los telescopios, pero, dado lo remoto del sitio y sus características climatológicas, también para todas las funciones que requieren de la presencia de una población de 20-25 personas de manera permanente. Las telecomunicaciones se dan hacia el exterior a través de una conexión de 2Mbit/s, lo cual es marginalmente suficiente para las necesidades presentes.

En vista de lo anterior, la UNAM ha trabajado por varios años en un proyecto para construir una línea de media tensión de electricidad, y fibra óptica hasta el OAN-San Pedro Mártir, solucionando así ambas limitantes con una sola instalación. En octubre de 2012 la Universidad Nacional Autónoma de México y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) firmaron un convenio mediante el cual dicha línea será construida, co-financiada por ambos. El suministro de energía está planeado para 1 MW, y el ancho de banda iniciará en 100Mb/s, pudiendo crecer conforme a la demanda hasta 10Gb/s. La obra está planeada para concluir en 2015.

El camino, la energía y las telecomunicaciones quedarán así completos, y junto con la seguridad jurídica arriba mencionada, colocan al OAN-San Pedro Mártir, ya entre los mejores sitios por sus propiedades naturales, al nivel de los mejores en el mundo también por su infraestructura de servicios básicos.

PROYECTOS ESPECÍFICOS DE DESARROLLO

La comunidad científica debe proponer proyectos de gran envergadura, con socios estratégicos definidos en temas concretos como palanca para lograr el desarrollo y crecimiento deseados, vinculándose lo más posible con el sector industrial y productivo. Por otro lado, el Estado mexicano debe comprometerse a una estrategia de largo plazo, coherente, en la que se apoye la formación de recursos humanos, la inversión en proyectos de desarrollo tecnológico y la

interacción entre el sector académico y el sector industrial. El financiamiento a plazos de 5-10 años y mayores, y sobre todo, trans-sexenal, es clave.

Por otro lado, es muy importante contar con experiencia en desarrollos concretos a pequeña y mediana escala, tanto en plazos como en recursos, que den la experiencia y seguridad a todos los involucrados, de que se pueden hacer proyectos más ambiciosos y a mayor escala. Aquí doy algunos ejemplos en tal sentido, de diversos proyectos y colaboraciones, en curso o planeadas.

RATIR (Re-Ionization and Transients InfraRed camera)

El proyecto RATIR realizó el diseño, fabricación y puesta en operación de una cámara óptico/infrarroja de 6 canales, montada en el telescopio *Harold Johnson* de 1.5 m en el OAN/San Pedro Mártir. Está dedicada al seguimiento de las contrapartes de fuentes transitorias de alta energía detectadas por el satélite SWIFT, en particular los destellos de rayos gamma a distancias cosmológicas. Estos son eventos interesantes en sí mismos, pero que además sirven como herramientas para el estudio de la estructura del universo a gran escala. El proyecto es una colaboración entre el Instituto de Astronomía de la UNAM, la Universidad de California (UC) y la *National Aeronautics and Space Administration* a través del *Goddard Space Flight Center* (NASA/GSFC) y la Universidad Estatal de Arizona (ASU). El proyecto inició 2008 y la cámara fue instalada en el telescopio en verano de 2012, donde se llevó a cabo la verificación y pruebas. Desde enero de 2013 está en operaciones de rutina dando servicio a la comunidad de usuarios. Fue financiado por NASA/GSFC, UC y el IA-UNAM, la cámara tiene un costo aproximado de 1.1 millones de dólares, que fueron aportados por la UC y NASA/GSFC. La inversión para la robotización del telescopio, alrededor de 100 mil dólares, fue aportada por el IA-UNAM.

El proyecto tiene su propia justificación científica en el estudio de las fuentes transitorias, pero sirve también como programa piloto para mayor colaboración con los socios externos. Esto se refiere particularmente a: establecer colaboraciones científicas en temas del cielo variable; caracterizar

el cielo en el OAN/San Pedro Mártir de manera sistemática en el cercano; adquirir experiencia técnica en el manejo de los datos y detectores; adquirir experiencia en el manejo de proyectos entre las instituciones participantes a escala pequeña antes de hacerlo a una mayor.

Observatorio HAWC (High Altitude Water Čerenkov)

El proyecto *HAWC (High Altitude Water Čerenkov observatory)* contempla el diseño, fabricación y operación de un observatorio de altas energías mediante la detección de radiación secundaria en 300 detectores de luz Čerenkov en agua, instalados en el Volcán Sierra Negra, Puebla, sitio a cargo del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). *HAWC* es una colaboración entre EU y México, liderado por *Los Alamos National Laboratory* y la Universidad de Maryland, y el INAOE y la Universidad Nacional Autónoma de México, respectivamente, pero con aproximadamente una docena de instituciones participantes en cada país. El observatorio inició con una fase de prototipo de 7 tanques (VAMOS) en 2011, llegó a 30 tanques en 2012, y ya a 100 en 2013. El avance ha sido conforme al calendario y presupuesto planteados inicialmente, superando con éxito las etapas de revisión externa que se acostumbran para estos proyectos, por parte de la *National Science Foundation (NSF)* y el *Department of Energy (DOE)* de EU. La construcción terminará en 2014 con los 300 tanques planeados, para convertirse en el detector de radiación de altas energías más poderoso del mundo. *HAWC* es co-financiado por México (a través del Conacyt y la Universidad Nacional Autónoma de México principalmente) y Estados Unidos, a través de NSF y DOE. La inversión total es de 15 millones de dólares.

El proyecto aportará conocimientos fundamentales sobre las características de fuentes astrofísicas en altas energías (cientos de MeV a cientos de TeV), galácticas y extra galácticas, en todo el cielo visible desde el sitio, tanto para fuentes estáticas como transitorias, complementando las observaciones realizadas con detectores satelitales (por ejemplo, FERMI). No existe otro observatorio con las características de *HAWC* en el mundo.

HAWC dará una visión nueva sobre el universo en estas bandas de energía, lo que implica trabajo tanto observacional como teórico, en una de las disciplinas astrofísicas con mayor crecimiento en los últimos años. Desde el punto de vista técnico, hay grupos en la UNAM y en México en general participando en diversas áreas del proyecto, como electrónica, análisis de datos y simulaciones.

Proyecto TAOS-II (Trans Neptunian Automated Occultation Survey)

El proyecto *TAOS-II (Trans-neptunian Automated Occultation Survey)* contempla el diseño, fabricación y operación de tres telescopios robóticos de 1.3m que serán instalados en el OAN/San Pedro Mártir. Estarán dedicados a la búsqueda de objetos trans-neptunianos mediante mediciones de ocultaciones de estrellas de fondo con fotometría rápida (20Hz). Es una colaboración entre la Academia Sinica de Taiwan (ASIAA), el *Smithsonian Astrophysical Observatory* (SAO) de la Universidad Harvard (EU) y el IA-UNAM, y se encuentra en curso. La colaboración decidió a finales de 2010 instalar los telescopios en el OAN/San Pedro Mártir y se trabaja el diseño de la instrumentación y de los telescopios. Los permisos ambientales por parte de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales se obtuvieron en 2012 y se iniciaron las obras de construcción en 2013. Los telescopios estarán instalados en 2014. Es el primer proyecto internacional que colocará telescopios en el OAN-San Pedro Mártir, los primeros desde 1979, cuando fue inaugurado el telescopio de 2.1 m. El financiamiento, por un total de 15 millones de dólares, es mayoritariamente (~90%) de ASIAA. México, a través de la UNAM se hará cargo de la infraestructura de servicio para los telescopios, de la operación y mantenimiento de la instrumentación y telescopios, y tendrá participación científica y de instrumentación en una de las cámaras ópticas.

TAOS-II aportará conocimientos fundamentales sobre la distribución de objetos en las regiones más externas del Sistema Solar, lo que tiene implicaciones no solo para la historia y evolución de nuestro sistema, sino de la formación y estado de esta clase de sistemas en la galaxia en general.

San Pedro Mártir Telescope (SPMT)

El proyecto SPMT contempla el diseño, construcción y operación de un telescopio de 6.5 m óptico-infrarrojo en el OAN-San Pedro Mártir. La Universidad de Arizona y el *Smithsonian Astrophysical Observatory* (SAO), que operan el observatorio MMT en Mt. Hopkins, Arizona, se acercaron a México para buscar mejorar el aprovechamiento científico del MMT, e impulsar el desarrollo del SPMT en México en un proyecto conjunto de beneficio para ambas partes. El MMT fue uno de los primeros telescopios de 6.5 m y cuenta con instrumentación accesoria novedosa y compatible con el diseño planeado para el SPMT, que sería proporcionada para aprovechar las cualidades sobresalientes del cielo de San Pedro Mártir.

El financiamiento requerido para concretar el proyecto es de aproximadamente 70 millones de dólares en México, fundamentalmente para el telescopio y su estructura. La aportación de los socios de EU, a través de elementos ópticos e instrumentos existentes reduce muy considerablemente lo necesario para ponerlo en operación. Dados los diseños de referencia de telescopios similares, que operan con gran éxito desde hace varios años tanto en Arizona como en Chile en el observatorio de Las Campanas, el riesgo tecnológico asociado al proyecto es mínimo y este puede concretarse en 5 años si el financiamiento se puede dar de manera confiable.

Desarrollar el telescopio SPMT en México tendría una derrama de tecnología aplicada considerable, ampliando el impacto más allá de simplemente investigación básica a desarrollo de tecnología y formación de personal especializado en las ingenierías. La comunidad nacional ha manifestado su interés no sólo en los paquetes de desarrollo científico, sino de diseño y construcción, y la oportunidad para concretar el proyecto es excelente en este momento.

Como se puede apreciar, los plazos y los recursos requeridos para cada uno de estos ejemplos son distintos, y el financiamiento tiene una diversidad de fuentes, aprovechando las asociaciones con distintas organizaciones e instituciones dentro y fuera del país para maximizar la inversión, y por lo tanto, el impacto y beneficio que tendrá para nuestro país.

Lo anterior por supuesto no excluye la participación en proyectos que no están basados en México, pero con una componente nacional que puede

ser muy relevante. Un ejemplo notable en este sentido es la participación mexicana en el Gran Telescopio Canarias. Aunque minoritaria (5%), tiene beneficios muy importantes para nuestra comunidad, y para su vinculación con el sector industrial de nuestro país. Por un lado, ser socios del GTC da acceso a todos los astrónomos nacionales a tiempo de observación en lo que hoy es el telescopio óptico-infrarrojo más grande del mundo, con 10.4 m de apertura. Segundo, México ha aprovechado el proyecto para desarrollar sus grupos técnicos y de desarrollo tecnológico fabricando instrumentos para el GTC: cámara de verificación, instrumento OSIRIS (de primera luz y aparato con el que el GTC ha hecho ciencia desde su inauguración en 2009), e instrumento FRIDA, en curso y programado para entrega en 2016. Un segundo caso es la participación en lo que medido de diversas maneras, ha sido el proyecto astronómico con mayor impacto en la historia de la disciplina, el *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), que iniciará su 4ta etapa en 2014, y en la que la Universidad Nacional Autónoma de México participa. El SDSS opera en un telescopio de 2.5 m en *Apache Point Observatory* (APO), Nuevo México, y en esta nueva fase llevará a cabo 3 proyectos que tocan muy diversas áreas de investigación, desde la estructura de nuestra Vía Láctea, hasta los cúasares a alto corrimiento al rojo y la cosmología, pasando por la cinemática de una enorme muestra de galaxias cercanas. Los temas, y sobre todo la forma, de abordar la investigación, con grandes muestras y censos muy completos de todo el cielo, o regiones grandes de él, dan pie a una renovación y revigorización de la manera de hacer astronomía en la que México debe participar para seguir siendo un actor de reconocida calidad a nivel internacional.



LA PROMOCIÓN DE LA ASTRONOMÍA Y SUS GRANDES PROYECTOS EN MÉXICO

*Héctor Bravo Alfaro**

INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como objetivo ofrecer un contexto dentro del cual la astronomía y los grandes proyectos instrumentales de nuestro país en esta disciplina, debían ser divulgados y, de cierta manera, compartidos con amplios sectores de la población para su conocimiento. Esto, a la larga, redundará en mayor interés y apoyo de la sociedad para la puesta en marcha de los proyectos, así como de los nuevos programas e instrumentos científicos que van a requerir de grandes inversiones.

Es bien sabido que en México tenemos un fuerte déficit de científicos en todas las áreas del conocimiento y la astronomía no es la excepción. Sin embargo, también es cierto que esta ciencia tiene una milenaria tradición en nuestro país, misma que fue desarrollada con renovado ímpetu desde la segunda mitad del siglo XIX. Hoy en día, con poco más de 200 astrónomos profesionales en México, la calidad de esta ciencia a nivel internacional es una de las de mayor impacto internacional entre todas las ciencias desarrolladas en el país. Pero sigue siendo cierto que nuestro cociente de 500 000 habitantes por cada astrónomo, es diez veces menor que en países de Europa occidental, Japón o Estados Unidos. Estas cifras, que no hacen más que reflejar la realidad nacional y se repite si se consideran las otras ramas de la ciencia.

La importancia de organizar foros y mesas redondas de ciencia entre académicos y con la sociedad civil, reside en hacer conciencia en esta

* Departamento de Astronomía, Universidad de Guanajuato.

última sobre el impacto positivo que tiene el desarrollo científico y tecnológico. Está ampliamente demostrado que aquellos países que invierten mayores recursos materiales y humanos en el impulso de la ciencia logran, en periodos relativamente cortos, mejorar sus índices generales de calidad de vida. Aunque la ciencia no resuelve *per se* todos los atrasos socioculturales, es claro que constituye un elemento fundamental para el desarrollo equilibrado de la sociedad.

LA ASTRONOMÍA MODERNA EN MÉXICO

Gracias al impacto y a la proyección internacional que ha ganado la astronomía mexicana en toda la segunda mitad del siglo xx, esta ciencia se ha beneficiado con la inversión en observatorios, tanto el Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir, como el Observatorio Guillermo Haro de Cananea. Más recientemente fueron apoyados algunos proyectos entre los que se cuentan el Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano* (GTM), el observatorio *HAWC* (*High Altitude Water Čerenkov*), una colaboración con el NRAO de Estados Unidos (*National Radio Astronomy Observatory*) para el EVLA (*Extended Very Large Array*), y otro instrumental, el espectrógrafo OSIRIS para el Gran Telescopio de Canarias (GTC) en colaboración con el Instituto Astrofísico de Canarias de España. Los detalles de algunos de estos proyectos son el tema de otras contribuciones de este mismo volumen. Sin embargo, con estos programas apenas se está comenzando a resarcir el considerable retraso que existía en la inversión mexicana para nuevos proyectos observacionales e instrumentales en astronomía. Por otra parte, varias instituciones han asumido la enorme responsabilidad de formar, con muy elevados estándares de calidad, a las nuevas generaciones de astrónomos mexicanos quienes, con mucho éxito, están ya trabajando como académicos independientes, a menudo en el extranjero. Y es justamente en este contexto en el que la falta de nuevos proyectos mexicanos e instrumentos de vanguardia ha quedado en evidencia, quedando como tarea de los académicos el convencer a las autoridades y a la sociedad de la necesidad de revertir esta situación.

Una de las estrategias para promover el apoyo a proyectos ya en marcha o aún por construirse, es justamente la difusión de la ciencia a todos los niveles. El caso de la astronomía es muy particular ya que la mayor parte de sus líneas de investigación pertenecen a lo que suele denominarse *ciencia básica*, es decir, una disciplina cuyos objetivos fundamentales están ligados a la generación de conocimiento, en este caso el entendimiento del origen, evolución y destino del universo y de los elementos que lo conforman. Como contraparte, la *ciencia aplicada* define sus objetivos con base en la solución de problemas específicos, los cuales pueden pertenecer a cualquier rama del conocimiento. En muchos países en vías de desarrollo, como el nuestro, existe un error común al definir las respectivas estrategias nacionales de desarrollo de ciencia y tecnología; dicho error es el de apoyar únicamente a la ciencia aplicada, sacrificando parcial o totalmente la ciencia básica por considerársele poco útil a la solución de los problemas socio-culturales de estos países. Sin embargo, es tarea de las academias, en todos sus niveles, el convencer a sus autoridades de que sólo un avance equilibrado de la ciencia, tanto básica como aplicada, garantiza sus efectos positivos a largo plazo, tal como ha sido probado en los países más desarrollados del orbe. De hecho, hoy en día la distinción entre ciencia básica y aplicada es cada vez más sutil. Prueba de ello, en el caso de la astrofísica contemporánea, es la cantidad de instrumentos y herramientas (por ejemplo para análisis de imágenes digitales) que han sido desarrollados inicialmente para la astronomía y que posteriormente han encontrado múltiples aplicaciones en la industria y en otras áreas del conocimiento, por ejemplo en medicina.

ESTRATEGIAS PARA PROMOVER LOS PROYECTOS ASTRONÓMICOS

Otra peculiaridad de la astronomía como ciencia es su elevado grado de penetración en la sociedad y el gran interés que los descubrimientos astronómicos despiertan en el público en general. A este factor queremos hacer referencia como un elemento clave para difundir nuestros proyectos más importantes y para involucrar a la sociedad en el avance científico que con ellos se espera alcanzar. Este hecho ha sido entendido y aplicado de manera

exitosa primero en Estados Unidos, en donde son considerables los recursos para difundir el conocimiento producido gracias a los modernos y muy costosos instrumentos astronómicos; la NASA y el *Hubble Space Telescope* son, sin duda, el mejor ejemplo. A pesar de no contar con proyectos de esa envergadura en México, la experiencia de países con ciencia y tecnología altamente desarrollada es que cada gran proyecto debe incluir su propia campaña de promoción, las cuales deben mostrar cuales son los beneficios que se espera obtener, al margen de los frutos puramente científicos. Las estrategias de promoción pueden focalizarse en responder preguntas como las siguientes:

- ¿Qué tipo y cuántos empleos se van a generar durante la planeación, construcción y puesta en marcha del instrumento?
- ¿Qué clase de tecnologías e innovaciones se espera desarrollar con el proyecto en cuestión?
- ¿Qué aplicaciones en otras áreas de conocimiento pueden tener dichos avances tecnológicos?
- ¿Qué requerimientos de cuadros de jóvenes académicos van a producirse con el proyecto?
- ¿Cuáles son las instituciones encargadas de producir estas nuevas generaciones de académicos y cuáles serán sus estándares de calidad?
- ¿Habrá algún tipo de inversión extranjera y/o de la iniciativa privada en el proyecto? Describir esa derrama económica.
- En paralelo a los objetivos científicos ¿qué impacto tendrá el proyecto en la sociedad, mediante programas educativos que permita a un público más amplio acercarse y entender el funcionamiento del instrumento en cuestión?

Es en este ámbito en el que todas las instituciones astronómicas del país con programas de formación de jóvenes astrónomos tienen una función muy importante a desarrollar: no es únicamente enviar al mercado laboral a jóvenes con grado de doctor en ciencia, sino producir académicos con una formación integral, conscientes del rol que la ciencia debe jugar en un país como el nuestro.

Por último, y para que los académicos tanto jóvenes como maduros, continúen participando en esta labor de socialización del conocimiento, el sistema (institutos, universidades, secretarías y consejos federales y estatales de ciencia y tecnología) debe proveerles de los recursos, incentivos y reconocimientos que corresponden a una labor que requiere de grandes esfuerzos y de una considerable fracción del tiempo laboral de los investigadores.

LA ASTRONOMÍA EN LA UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

El Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato, con casi veinte años de haber sido fundado, y con doce académicos en el Sistema Nacional de Investigadores (SNI), tiene muy claro el escenario descrito anteriormente. Para ello, se abrió en 2004 un programa de maestría y doctorado en Astrofísica, que constituye apenas el tercero en su área, además de los anteriormente ofrecidos por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Contamos ya con varios egresados en ambos niveles, maestría y doctorado y, además de mantener un alto estándar de calidad en sus tesis, también hemos integrado permanentemente a nuestros alumnos en los diversos programas de divulgación científica que mantenemos en el Departamento de Astronomía.

El Departamento de Astronomía cuenta con dos observatorios, uno profesional en la población de Mineral de La Luz, y un observatorio abierto al público en el edificio central de la Universidad de Guanajuato (véase figura 1). En este último sitio llevamos a cabo programas como los siguientes:

- Ciclos de conferencias de astronomía para todo público (24 ediciones).
- Curso de actualización en Astronomía para maestros de educación básica (7 ediciones).
- Programa permanente de visitas diurnas de grupos escolares.
- Programa de observaciones nocturnas para todo público (diario).
- Escuela Nacional de Astrofísica de la Universidad de Guanajuato (4 ediciones).



Foto: Klaus P. Schroeder, Universidad de Guanajuato.

Figura 1: El Telescopio Robótico de Hamburgo, instalado recientemente en el Observatorio Mineral de la Luz, del Departamento de Astronomía de la Universidad de Guanajuato.

CONCLUSIONES

Consideramos que para obtener el apoyo que requieren los grandes proyectos astronómicos por venir, los académicos involucrados debemos diseñar y mantener programas de difusión científica que involucren en lo posible a todos los actores de la sociedad. Para ello se debe contar con recursos disponibles mediante proyectos ofertados, entre otros, por los consejos estatales de ciencia y tecnología. También deben ponerse en práctica programas de estímulo a los investigadores que se dedican activamente a la divulgación científica, tanto a nivel interno (de las instituciones donde se labora) como externo (por ejemplo del SNI, AMC, etcétera.) En el caso de investigadores de las instituciones del interior de la república, que gozan de menores recursos que la Universidad Nacional Autónoma de México o los centros Conacyt, también debía ponderarse el tiempo dedicado a la formación de las nuevas

generaciones de académicos ya que, en universidades como la de Guanajuato o Guadalajara (por mencionar sólo un par de ejemplos), el tiempo dedicado a la docencia rebasa por mucho 50% de la jornada total. Si las evaluaciones periódicas a las que son sometidos los investigadores tomaran en cuenta estos elementos, los jóvenes científicos se mantendrían más activos en estas tareas docencia y divulgación que, junto a la investigación científica, son las actividades fundamentales que todo académico debía realizar.



LA INTERACCIÓN DE LA ASTRONOMÍA CON EL SECTOR INDUSTRIAL, TECNOLÓGICO Y PRODUCTIVO

*Vicente Bringas Rico**

La interacción de la astronomía con el sector industrial, tecnológico y productivo en México ha tenido un crecimiento importante en años recientes, esto debido a la instalación en México de importantes empresas del sector aeronáutico. Dichas empresas al igual que los proyectos astronómicos, demandan de tecnologías de alto nivel, las cuales permiten desarrollar la cadena de valor, entre las universidades, los centros públicos de investigación y la industria, de esta forma se articula la triple hélice consistente en la interrelación academia-investigación-industria.

Entre los temas más importantes se encuentran, la administración de proyectos de acuerdo a estándares aeroespaciales, las certificaciones internacionales, el diseño, las tecnologías de manufactura, la electrónica y control, y la logística y cadenas de suministro. A continuación se describe en más detalle cada una de ellas.

ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS DE ACUERDO A ESTÁNDARES AEROESPACIALES

Consiste en el despliegue de estrategias de administración y control de proyectos de gran envergadura, interinstitucionales e internacionales, con las técnicas de *Project Management Institute* (PMI), *European Cooperation for Space Standardization* (ECSS), *European Space Agency* (ESA), *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y del departamento de defensa

* Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial.

de Estados Unidos. El conocimiento se despliega durante la ejecución de este tipo de proyectos, abarcando desde la planeación, diseño y ejecución, con la participación de las diferentes instancias generadoras del conocimiento. Estas transfieren la tecnología durante la ejecución de la construcción y puesta en operación a las empresas pequeñas y medianas del sector industrial en México. Con lo anterior se contribuye al incremento de conocimiento y capacidades en la industria, con una consecuente derrama tecnológica y económica. Esto impacta también, a futuro, en proyectos industriales de otra naturaleza no astronómica derivados del conocimiento de alto nivel capitalizado durante las aplicaciones astronómicas.

CERTIFICACIONES INTERNACIONALES

La ejecución de estos proyectos requieren de la certificación a nivel internacional en ISO 9001 y 17025, AS 9100 y NADCAP, así como otras certificaciones particulares. El desarrollo de este tipo de proyectos genera cadenas de valor, las cuales obligan no sólo a la transferencia del conocimiento generado en las universidades y centros públicos de investigación en el momento de la concepción y diseño de los productos tecnológicos. Además, obliga a promover una cadena de proveedores industriales certificados, con el fin de asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad internacionales durante la fabricación e integración. Una vez que se logra tener un conjunto de proveedores certificados, estos se convierten en proveedores elegibles para las industrias aeronáutica, automotriz y de energía, logrando cadenas regionales de valor, especializadas en productos de alta tecnología.

DISEÑO

Los retos en el diseño son muy grandes, ello genera capacidades de desarrollo de alta tecnología con los siguientes rubros importantes:

- Evaluación numérica del comportamiento de componentes y estructuras.
- Diseño de sistemas para ambientes extremos de operación (vacío, alta y baja temperatura).
- Diseño de sistemas de alta precisión en posicionamiento y repetibilidad.
- Diseño de sistemas de blindaje térmico, a la radiación; sistemas de alta y baja conductividad.
- Diseño de equipo de proceso (manipulación en plataforma aluminizado, tratamientos, entre otros).

TECNOLOGÍAS DE MANUFACTURA

El desarrollo de tecnologías de manufactura en México, producto de estos proyectos, eleva las capacidades de la proveeduría local de pequeñas y medianas empresas, todo ello bajo un marco de transferencia de tecnología derivada de la etapa de diseño a cargo de entidades como el Instituto de Astronomía de la UNAM o Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, aprovechando su fortaleza de vinculación industrial y sus líneas de conocimiento en materia de manufactura. Los temas de interacción con la industria son los siguientes:

- Tecnologías de mecanizado de alta precisión en aleaciones aeroespaciales, aceros aleados, acero inoxidable, aluminio, titanio.
- Tecnologías de construcción de grandes estructuras.
- Tecnologías de soldadura, CMT, TIG, MIG, láser.
- Manufactura aditiva y de recubrimiento (sinterizado láser, HVOF, cladding).
- Manufactura híbrida (aditiva, soldadura, electroerosión, haz de electrones).
- Tecnologías de relevado de esfuerzos y envejecimiento.
- Materiales compuestos (diseño, aplicación y mecanizado).
- Fabricación de bajo volumen y alta mezcla.

ELECTRÓNICA Y CONTROL

Los proyectos astronómicos requieren la interacción entre los centros de desarrollo y la industria fabricante de sistemas en los siguientes rubros:

- Diseño de sistemas electrónicos.
- Sistemas de compactación y transferencia de datos.
- Sistemas SCADA y de control inteligente.
- Compatibilidad electromagnética.
- Sistemas de bajo consumo.
- Sistemas con uso de energías alternas.
- Sistemas automatizados y robotizado con comunicación remota.

LOGÍSTICA Y CADENAS DE SUMINISTRO

La magnitud de los proyectos astronómicos pone en acción las cadenas de soporte, proveeduría y logística de la región, y requieren una serie de proveedores de servicios en los siguientes rubros:

- Logística de transporte multimodal.
- Cadenas de suministros de operación, soporte y mantenimiento.
- Inventarios.
- Comunicaciones.
- Publicidad e interacción con la comunidad.

En conclusión, el desarrollo de proyectos astronómicos en México como instrumentos científicos y telescopios, genera cadenas de valor entre academia-investigación-industria, que después se transforman en conocimiento y tecnología susceptible a ser transferida a otras ramas de la industria como la aeronáutica, la automotriz y la metalmecánica en general.

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO ALFONSO SERRANO

*David H. Hughes**

EL DESARROLLO DE LA ASTRONOMÍA MILIMÉTRICA EN MÉXICO

La comunidad astronómica en México ha tenido un crecimiento estable desde 1960. A partir de 1990 este crecimiento se ha acelerado y hoy en día contamos con 234 astrónomos. Sin embargo, esto significa que solamente uno de cada 500 000 mexicanos es un astrónomo. Esto es diez veces menos que en Estados Unidos, y ocho veces menos que en España. Existe un alto potencial de crecimiento en la ciencia astronómica en México, pero este crecimiento se debe combinar con calidad en la investigación y la producción científica.

En general, los mejores científicos de México tienen el mismo impacto que los mejores del mundo, pero el impacto promedio de los investigadores en México ha decaído desde 1980 cuando se hizo la última inversión en infraestructura durante la construcción de los telescopios ópticos del Observatorio Astrofísico Guillermo Haro (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) en Cananea y del Observatorio Astronómico Nacional (Universidad Nacional Autónoma de México) en San Pedro Mártir. Hoy el impacto científico de la comunidad mexicana es menor que el promedio mundial (Conacyt, Estado de la ciencia 2006).

Una fuerte contribución a esta situación es que el resto del mundo ha invertido de manera considerable en nuevas infraestructuras durante los últimos 30 años, como telescopios terrestres funcionando en el óptico,

* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

infrarrojo y radio así como varios telescopios espaciales, por lo que hoy en día gozan de los beneficios de haber invertido en dichas infraestructuras. Además, aproximadamente 100 000 millones de pesos se invierten en el mundo en proyectos internacionales para construir la nueva generación de telescopios con el propósito de avanzar en nuestra comprensión de la formación y evolución del universo. En México, en el campo de astronomía, la única excepción en la última década, es la inversión de inversiones, 1 500 millones de pesos en el proyecto del Gran Telescopio Milimétrico (GTM).

Históricamente la comunidad astronómica mexicana tiene intereses científicos en la longitudes de onda ópticas y infrarrojas, pero recientemente en los institutos y universidades mexicanos hay más investigación en la formación y evolución de estructura con observaciones usando los telescopios internacionales en la región de la radio y milimétrica. Claramente tenemos que crear una comunidad milimétrica establecida en México para justificar la inversión en el GTM y los costos continuos de operación durante las siguientes décadas. Este crecimiento se debe incrementar por un factor de 4 (25-30%) para cumplir con las experiencias y ejemplos de otros países con comunidades que trabajan en la astronomía milimétrica. Para lograr este crecimiento se debe invertir en las próximas generaciones de estudiantes, investigadores jóvenes, el desarrollo de los instrumentos científicos y las colaboraciones internacionales para mejorar la competitividad del GTM.

El GTM actualmente, usando los 32 m de diámetro interiores de la superficie reflectora primaria, es un radio telescopio competitivo. El GTM está comenzando su campaña de observaciones científicas, y como resultado de éstas, podremos ver un incremento en el impacto que tendrá la comunidad científica mexicana. Por ejemplo, uno de los primeros instrumentos del GTM, la cámara AZTEC, fue instalada en un telescopio submilimétrico (ASTE – *Atacama Submillimeter Telescope Experiment*) en el desierto de Atacama, Chile por dos periodos de 6 meses en los años 2007 y 2008. El ASTE tiene solamente un diámetro de 10 m, pero AZTEC se ha generado más de 30 publicaciones con un impacto que está por arriba del promedio mundial. Entonces podemos esperar más atención por la comunidad científica internacional con los resultados del GTM, un telescopio mucho más grande y competitivo.

EL GRAN TELESCOPIO MILIMÉTRICO ALFONSO SERRANO (GTM) – UN GRAN PROYECTO

El GTM es un proyecto científico binacional que ejecutan, por el lado de México, el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), y por Estados Unidos de América, la Universidad de Massachusetts en Amherst, a través del *Five College Radio Astronomy Observatory* (FCRAO). Su objetivo es el diseño, construcción, instalación y operación de una antena de 50 m de diámetro para la investigación en el área de la astronomía milimétrica con arreglos de instrumentos que trabajen en frecuencias del espectro electromagnético en el rango de 90 a 300 GHz. El 20 de febrero de 1997 se seleccionó al volcán Sierra Negra, con una altura de aproximadamente 4600 metros sobre el nivel del mar para instalar el telescopio milimétrico (véase la figura 1). La construcción de los telescopios milimétricos en los lugares más altos del mundo es necesaria para mejorar la sensibilidad de los instrumentos y las observaciones astronómicas debido al contenido de vapor de agua y la absorción de la radiación milimétrica en la columna atmosférica. Por eso, los telescopios milimétricos están construidos en los sitios secos y altos, como el desierto de Atacama, Chile; el volcán Mauna Kea, Hawaii; el polo sur, Antártida; y el volcán Sierra Negra, México. Cuando se encuentre en plena operación de acuerdo a las especificaciones de diseño, el GTM será, en su tipo, el telescopio más grande y preciso en el mundo para las observaciones astronómicas a frecuencias milimétricas.

El caso científico del GTM es principalmente el estudio de la formación protoplanetaria, formación estelar y la evolución de la estructura (galaxias, cúmulos de galaxias, medio interestelar e intergaláctico) del universo durante los últimos 13.8 mil millones de años. En comparación con los telescopios milimétricos ya construidos y funcionando por los últimos 20 años, el GTM tendrá más sensibilidad y resolución espacial debido a su mayor tamaño y desempeño. El GTM será entonces un telescopio milimétrico mucho más eficiente y poderoso; podrá ofrecer un mayor impacto científico a la comunidad astronómica mexicana.

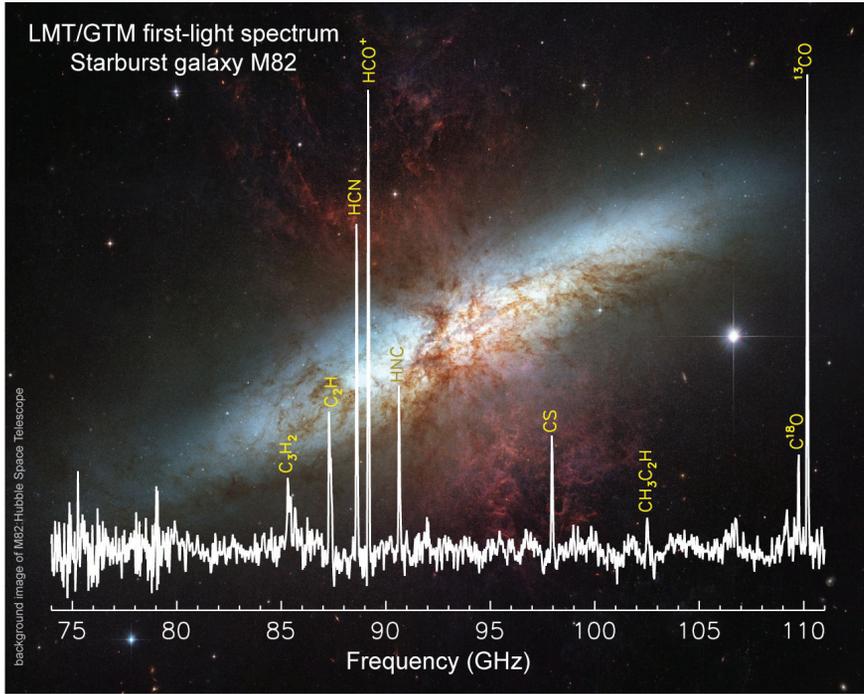
El 1 de junio de 2011 el GTM comenzó las primeras observaciones científicas, la “Primera Luz” del GTM, con el *Redshift Search Receiver* (un

espectrómetro de banda ancha) a 3 mm hacia galaxias en formación en el universo local y distante, alcanzando la meta establecida para demostrar la observación científica de fuentes astronómicas. Las primeras observaciones hacia la galaxia cercana y brillante denominada M82 (véase la figura 2). La observación del GTM fue hacia el núcleo de la galaxia cercana y brillante M82 que está formando estrellas a una tasa aproximadamente tres veces mayor que la Vía Láctea. La imagen de fondo muestra la emisión óptica rastreada a través de observaciones de alta resolución espacial con el Telescopio Hubble. La línea espectral muestra el espectro completo de 3mm detectado en una sola observación con el GTM. Varias líneas de transición molecular son identificadas y confirman observaciones previas a 3mm que apuntaron al mismo lugar dentro de esta galaxia; y la comparación de estos datos con observaciones del mismo instrumento cuando fue instalado en el telescopio de 14m del FCRAO en 2009, permitieron confirmar clara e inmediatamente que tanto el *Redshift Search Receiver* de 3 mm como todos los subsistemas del telescopio funcionaron.



Foto: David Gale / INAOE.

Figura 1: El Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano* ubicado en la cima del volcán Sierra Negra a una altitud de 4 600 metros sobre el nivel del mar.

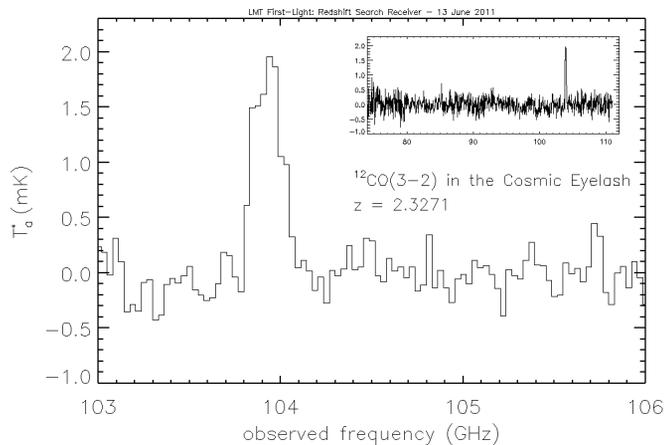


Crédito: INAOE.

Figura 2: “Primera Luz” del GTM a 3 mm con el espectrógrafo de banda ancha (*Redshift Search Receiver*), el 1º de junio de 2011. La observación del GTM fue hacia el núcleo de la galaxia cercana y brillante M82.

De manera más importante, la detección exitosa de transiciones de monóxido de carbono (CO) molecular hacia galaxias amplificadas por lentes gravitacionales a distancias de más de 10 mil millones de años luz, confirmaron la capacidad del GTM de ser un telescopio competitivo (véase figura 3). La parte interna muestra el espectro completo a 3 mm (ancho de banda de 35 GHz) con la línea molecular de CO (3-2) corrida al rojo a 103.95 GHz bien identificada. El recuadro muestra una ampliación del espectro alrededor de la línea de monóxido de carbono. Un mes después, en julio de 2011, la cámara AZTEC logró también observaciones continuas de primera luz en el rango de 1 mm, con observaciones de regiones galácticas con formación estelar que confirmaron estructuras ya detectadas por otros telescopios. La serie de observaciones de “Primera Luz” demostraron que todos

los subsistemas (electro-mecánicos y ópticos) del telescopio, así como los sistemas de control, instrumentación y *software* están integrados y operacionales. Sin embargo, las mismas observaciones nos demostraron que era necesario mejorar el desempeño del telescopio, particularmente en la alineación de la superficie reflectora primaria y los otros ópticos. Entonces, el proyecto concentró la mayoría de los esfuerzos de ingeniería –durante los últimos 18 meses– en este trabajo, con un resultado exitoso; un incremento de un factor superior a 40 en la eficiencia de la antena en la banda de 1 mm.



Crédito: INAOE.

Figura 3: "Primera Luz" del GTM a 3 mm con el espectrógrafo de banda ancha (Redshift Search Receiver), el 13 de junio de 2011, hacia la galaxia "Cosmic Eyelash".

Un aspecto importante derivado de la ejecución del GTM, un instrumento astronómico de frontera, es la formación de recursos humanos, tanto en la rama científica para el cual se ha construido el telescopio, promoviendo el surgimiento de una nueva generación de investigadores en astronomía milimétrica, como en áreas que son críticas para el desarrollo nacional, como son las comunicaciones en altas frecuencias, la ingeniería electrónica y de control, la metrología y la ingeniería de estructuras inteligentes, entre otras.

Asimismo, el INAOE ha logrado generar una infraestructura humana y material con grandes capacidades en el área de instrumentación astronómica,

las comunicaciones de microondas y de altas frecuencias, la metrología, el control, el análisis de ingeniería y la generación de grandes superficies de alta precisión. Esta infraestructura, con los programas adecuados de vinculación y de transferencia de tecnología, puede ser un soporte muy importante para el sector productivo de México.

Una vez completado, el GTM se transformará en un Observatorio Nacional, encargado de mantener la infraestructura creada en condiciones óptimas de operación para el desarrollo de los programas de investigación astronómica para los que fue concebido.

Por lo tanto la responsabilidad del Observatorio Nacional GTM es crear una infraestructura de clase mundial y desarrollar la comunidad de los astrónomos mexicanos en la ciencia astronómica milimétrica.

CONCLUSIÓN

Para terminar la historia sobre el interés de la humanidad en astronomía y en las preguntas fundamentales sobre la naturaleza del universo, sobre la construcción de los observatorios y telescopios más grandes del mundo en su época, y sobre la ambición de construir en México un gran telescopio milimétrico y contribuir al desarrollo de la comunidad científica astronómica a nivel mundial, se ha lanzado en marzo de 2013 la primera convocatoria para que la comunidad científica mexicana empiece a usar el GTM este mismo año.

El mayor legado del GTM, además de los resultados directos relacionados con nuestro mejor entendimiento del universo es y será la fuente de inspiración constante para jóvenes investigadores mexicanos para trabajar en áreas relacionadas con la ciencia, la ingeniería, la tecnología y las matemáticas que, a su vez, tienen un efecto positivo en economía y la sociedad en el futuro. El Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano* está al inicio de su gran aventura – su vida científica y productiva.



EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL EN SAN PEDRO MÁRTIR, BAJA CALIFORNIA

*J. Jesús González González**

INTRODUCCIÓN

Más allá de ser una ciencia básica con una base teórica físico-matemática fundamental y sólida, la astronomía es una ciencia esencialmente observacional. El sujeto de estudio es el cosmos que no podemos manipular para hacer “experimentos” diseñados y controlados en un laboratorio; nuestro laboratorio es el universo mismo que, dada su gran dimensión, edad y número de objetos nos da la oportunidad de ver –experimentar- todo tipo de fenómenos, incluidos los más energéticos, los muy poco frecuentes y aquellos fugaces o sutiles.

Como no podemos viajar fácilmente a las estrellas, prácticamente toda la información astronómica la obtenemos a partir del estudio de la luz. La luz es el informador más rápido y, por su interacción con los objetos que la generan, reflejan, absorben o dispersan, aunque lejanos y sin tocarlos, nos permite medir su movimiento y sus propiedades físicas y químicas. Los telescopios son nuestros colectores de luz, y por ello siempre se intentará hacerlos cada vez más grandes para poder estudiar objetos más y más débiles, ya sea intrínsecamente muy brillantes pero muy lejanos o más cercanos pero de mucho menor brillo.

* Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México.

LOS FENÓMENOS Y LA TECNOLOGÍA DIFIEREN CON LA ENERGÍA DE LA LUZ

En este sentido, la astronomía observacional podría llamarse “la ciencia de la luz”, y hoy en día la detecta y estudia en prácticamente todo el espectro electromagnético, o el amplísimo rango de energías de la luz, desde las ondas de radio de menor energía, las micro-ondas, el infrarrojo, la luz visible, el ultravioleta, los rayos X hasta la radiación gamma de mayor energía. La energía del fenómeno cósmico que estudiamos es proporcional a la energía de la luz con que lo observamos, en particular, en el rango visible para el ojo humano, vemos la luz de estrellas, planetas y nebulosas con temperaturas entre 1 000 y 20 000 grados. Asimismo, la tecnología para enfocar y detectar la luz varía ampliamente y los telescopios, instrumentos y detectores de rayos gamma, luz visible y de radio son físicamente y técnicamente muy diferentes.

TIPO DE OBSERVATORIOS EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

La atmósfera de la Tierra absorbe a distintas alturas prácticamente toda la radiación electromagnética excepto por la luz visible, las micro-ondas, el radio y algunas ventanas en el infrarrojo, por lo que las demás energías de la luz son observadas con satélites, globos o aviones. Los telescopios óptico-infrarrojos y radiotelescopios en la superficie terrestre y en o fuera de la atmósfera son complementarios y los primeros son generalmente mayores, más versátiles y más longevos.

Este trabajo se ocupa de los observatorios clásicos de radio, de micro-ondas y de altas energías en las que nuestro país está involucrado. Nos quedará claro que es muy importante complementar nuestro acceso a diversas longitudes de onda tanto en el extranjero como en México, en particular en lugares donde nuestro país puede ser especialmente competitivo. Uno de estos es San Pedro Mártir, en Baja California.

LA NATURALEZA DE LOS OBSERVATORIOS VISIBLE-INFRARROJOS

Para hacer observaciones astronómicas en el visible y el infrarrojo se requieren varias condiciones naturales que no se dan en cualquier lugar. Estas, principalmente son la oscuridad del sitio, la cantidad de noches despejadas y una baja turbulencia y dispersión de la atmósfera. Esto se puede dar en la primera cordillera después de un gran océano y por ello existen pocos sitios naturalmente privilegiados para ello. Entre los mejores cuatro se listan los archipiélagos de Hawaii, las Canarias, el norte de Chile, la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, México.

EL SITIO DE SAN PEDRO MÁRTIR

San Pedro Mártir fue identificado como sitio astronómico en la década de los sesenta y desde entonces ha sido desarrollado como el Observatorio Astronómico Nacional (OAN) operado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Actualmente cuenta con tres telescopios, el más grande de ellos inaugurado en 1979, de 2.1 m de diámetro y un gran número de instrumentos científicos e instalaciones de soporte. Su calidad, en términos de la transparencia, baja turbulencia y dispersión de su atmósfera así como del porcentaje de noches despejadas y la oscuridad del cielo han sido constatadas en los cuarenta años de su uso así como verificadas por diversos grupos independientes de otros países. De hecho, el sitio ha sido candidato finalista para albergar grandes proyectos internacionales, como son el Telescopio de Treinta Metros (TMT), el Gran Telescopio Sinóptico (LSST) y el Arreglo de Telescopios Čerenkov (CTA).

San Pedro Mártir es sin embargo el último de los mejores cuatro sitios en el mundo para la observación astronómica en el visible-infrarrojo en ser aprovechado con instrumentación astronómica de frontera. La comunidad astronómica nacional está convencida de que la mejor manera de proteger este patrimonio es desarrollarlo con la infraestructura, proyectos y protección legal adecuados.

EL DESARROLLO Y EL IMPACTO DE LOS 4 SITIOS PARA LA OBSERVACIÓN VISIBLE-IR

La escala de los modernos observatorios requieren equipos humanos e inversiones considerables. Es por ello que se desarrollan involucrando varias instituciones y países.

En los últimos cuarenta años, más de treinta países, no solo aquellos del primer mundo, han invertido varios miles de millones de dólares tan sólo en el diseño y construcción de más de 50 nuevos telescopios visible-infrarrojos mayores que nuestros dos metros en San Pedro Mártir y Cananea. La mayor parte de ellos, principalmente los más poderosos, se encuentran en Chile, Hawaii y las Canarias, pero también en otros sitios no tan naturalmente competitivos como San Pedro Mártir.

<i>Infraestructura y desarrollos en observatorios</i>	<i>Sitios astronómicos de excelencia</i>				
	<i>México San P. Mártir</i>	<i>España Canarias</i>	<i>EU Hawaii</i>	<i>Chile</i>	<i>Otros (22)</i>
Telescopios grandes (diámetro mayor a 2m)	1	6	11	15	37
Inversión en grandes telescopios (millones de dólares EU)	5	350	1,000	1,300	1,100
Inversión acumulada (en los últimos 20 años)	30	3,500	7,000	10,000	3,500
Instrumentos modernos (desarrollados en la última década)	3	15	40	80	100
Presupuesto anual (millones de dólares EU)	1	30	100	150	150
Artículos científicos por año	20	150	500	800	-
Países involucrados	1	16	15	25	40

Tabla 1: La inversión, producción y derrama científica de los sitios astronómicos son muy altas, como se ha demostrado en los otros tres sitios comparables a SPM y en muchos otros no tan buenos. (Se considera únicamente lo referente a telescopios óptico-infrarrojos y la información actualizada a 2008).

Si se considera la inversión en infraestructura de estos sitios, el desarrollo de la instrumentación y otros tipos de telescopios, la operación y la derrama de servicios y valor agregado, la inversión total es superior a los 10 000 millones de dólares en tres décadas. San Pedro Mártir debe de ser un catalizador de crecimiento científico y tecnológico similar y por ello es necesario transformarlo en un observatorio con proyectos internacionales de escalas y alcances científicos diversos.

Más allá del valor de la investigación astronómica como ciencia básica, se invierte significativamente en el desarrollo de los observatorios por muchas razones:

1. Son laboratorios internacionales, nacionales o de grandes grupos de investigación.
2. Utilizan, desarrollan e impulsa la tecnología de punta.
3. Cada telescopio es un desarrollo completo y único.
4. Su diseño y construcción representan una considerable inversión financiera que se distribuye en la industria estratégica o de desarrollo.
5. Los telescopios son laboratorios de larga vida (40 o más años) que de manera continua generan nuevos proyectos científicos a la par que desarrollan recursos humanos (científicos, ingenieros, gestores, etcétera.) y tecnológicos a través de nuevos y más modernos instrumentos y detectores).
6. Son un símbolo social, así como del poderío y orgullo nacional.

A lo largo de la historia, todo país con influencia la ha logrado por el conocimiento y el desarrollo de tecnología propia. Los desarrollos de telescopios e instrumentos astronómicos han probado ser una exitosa manera de cerrar el círculo virtuoso de la ciencia básica, el desarrollo de tecnología, la aplicación industrial, la capacitación de alto nivel y el desarrollo de economía, micro industria y beneficio social.

Es importante resaltar que la inversión y el nivel tecnológico de los modernos telescopios e instrumentos astronómicos son altos, y requieren

equipos multi e inter disciplinarios y así como grupos o consorcios de varias instituciones y países para desarrollarlos y aprovecharlos plena y adecuadamente. Como ejemplo, en cada uno de los observatorios en Hawaii, Chile y Canarias están involucrados entre quince y treinta países. En la última década, los socios de estos observatorios han desarrollado más de 100 instrumentos para sus telescopios, de cuyos datos directamente se publican cerca de 2 000 artículos arbitrados cada año, e invierten un total de cerca de 300 millones de dólares anualmente en su operación, mayoritariamente en empleos de diversos niveles así como en servicios localmente contratados. En contraste, nuestro observatorio en San Pedro Mártir ha sido operado y mantenido no solo por un país, México, sino por una sola institución, la Universidad Nacional Autónoma de México, lo que limita grandemente el aprovechamiento de su potencial.

EL DESARROLLO Y POTENCIAL DE SAN PEDRO MÁRTIR

El observatorio en San Pedro Mártir, Baja California, es un laboratorio fundamental para la astrofísica, las ciencias afines y para el desarrollo y derrama tecnológica del país. Es uno de los pocos y mejores sitios del mundo, naturalmente privilegiados para la observación óptica-infrarroja, sin embargo es el último de ellos en ser desarrollado al nivel de punta internacional actual.

Para el óptimo aprovechamiento de este recurso único, las instituciones astronómicas nacionales, sumadas a socios internacionales, buscan establecer un observatorio de frontera en San Pedro Mártir a través de:

1. Dotar al sitio de la infraestructura necesaria de comunicación y generación de energía así como de la protección jurídica y preservación para su mejor explotación científica.
2. Robotizar los telescopios actuales del observatorio y modernizar su instrumentación.
3. Iniciar proyectos de nuevos instrumentos y telescopios medianos, pero altamente competitivos, a desarrollarse en el corto plazo y

que sienten las bases de colaboraciones internacionales exitosas. En particular se mencionan:

- RATIR: Cámara muticanal en el visible e infrarrojo desarrollada por la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad de California y la NASA-Goddard que comenzó a operar en enero de 2013.
 - TAOSII: Conjunto de tres telescopios automatizados, entre otras cosas, para la detección y estudio de pequeños objetos del sistema solar (Taiwán, EU y México) en construcción.
 - BOOTES: red de telescopios robóticos medianos (España, Nueva Zelanda y China) para la exploración objetos transitorios del cielo, que colocará en breve un quinto sistema.
 - GFT: Telescopio robótico (México y Francia) para el seguimiento de destellos de rayos gamma, en etapa de diseño.
4. Desarrollar a mediano plazo, proyectos concretos de gran envergadura e impacto científico y tecnológico a nivel internacional. En particular se consideran:
- Un telescopio de 6.5 m (SASIR) con las Universidades Harvard y de Arizona.
 - El Arreglo de Telescopios *Čerenkov* (CTA) con 27 países.
5. Establecer las estructuras de planeación, gestión, vinculación y operación del proyecto San Pedro Mártir, bajo un esquema multidisciplinario con diversidad de instancias, instituciones e industrias dentro del país.
6. Fomentar la formación y crecimiento de centros de investigación en más universidades del país a través del acceso de proyectos en San Pedro Mártir (y los otros proyectos aquí presentados) bajo un esquema de política nacional coordinada.

De concretarse los proyectos grandes, la inversión de este desarrollo de San Pedro Mártir a mediano sería cercana a los 200 millones de dólares

durante la próxima década, y sería cubierta bajo una estructura mixta de capital público y privado, nacional e internacional.

Los observatorios son esencialmente los laboratorios de uso general de la comunidad astronómica que, si bien representan inversiones considerables, tienen una vida útil media superior a medio siglo.

LA ASTRONOMÍA EN MÉXICO Y SAN PEDRO MÁRTIR

Otros autores ya han dimensionado a la astronomía nacional tanto en números como en su contexto mundial, y sólo quisiera aquí recordar dos aspectos. Primero, la astronomía mexicana es la ciencia que tiene el mayor impacto y productividad a nivel mundial.

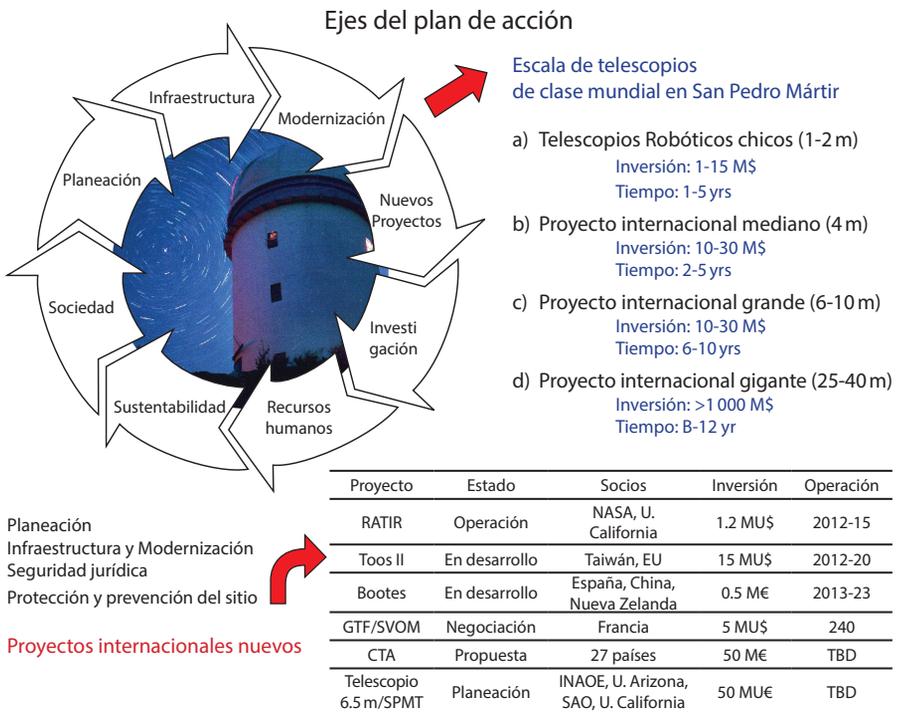


Figura1: El desarrollo y aprovechamiento de San Pedro Mártir integra diversos aspectos y disciplinas en proyectos de escalas diversas con diferentes grados de involucramiento internacional.

Por otro lado, el número de astrónomos en el país es aún muy bajo comparado con el tamaño de nuestra economía y con el número de universidades.

En México tenemos poco menos de 2 astrónomos por millón de habitantes, mientras que Chile tiene 4, Argentina 3, España 13 y Estados Unidos 20. La mayor parte de estos astrofísicos en México son investigadores en la UNAM y el INAOE (Puebla) y en menor medida en las universidades de Guanajuato, Guadalajara y Sonora.

A diferencia de los países que dominan la astronomía mundial, en los que ya existen grupos de astronomía en la mayoría de sus universidades y difícilmente se generan nuevas plazas, la investigación astronómica en México tiene un alto potencial de crecimiento a través de las universidades estatales al igual que otras públicas y privadas. San Pedro Mártir es un importante laboratorio nacional para apoyar este crecimiento.

CONCLUSIONES

La astronomía es una ciencia basada en la observación y su avance desarrolla telescopios cada vez más potentes que impulsan tecnologías cada vez más avanzadas. Los grandes telescopios dan servicio durante varias décadas y en su proceso continuo de instrumentación y modernización convierten a los observatorios astronómicos en magníficos laboratorios de prueba para un gran número de tecnologías y técnicas innovadoras con un amplio abanico de aplicaciones en la industria, la medicina y la vida cotidiana.

La astronomía, más allá de su belleza como ciencia básica y de su impacto en el desarrollo científico, cultural y educativo de un país –con su insaciable demanda de precisión y detalle– es siempre un motor vital del desarrollo tecnológico, una rica fuente de nuevos conceptos de ingeniería que repercuten en varias áreas comerciales, y un estímulo para la manufactura de competitivos equipos y de uso general para la sociedad.

México cuenta con un Observatorio Astronómico Nacional con más de 130 años de experiencia, hoy ubicado en San Pedro Mártir, B. C. (OAN). Por sus características naturales, este es un sitio excepcional para la observación

astronómica óptica e infrarroja, y está considerado entre los cuatro mejores lugares en el mundo para instalar grandes telescopios.

Es también el único que no ha sido desarrollado plenamente, por lo que está llamado a convertirse en un polo de desarrollo regional y nacional de varios niveles, permitiendo atraer grandes proyectos internacionales, y convirtiéndolo así en un importante catalizador de desarrollo científico y tecnológico para nuestro país.

EL OBSERVATORIO DE RAYOS GAMMA HAWC¹

*Alberto Carramiñana**

EL IMPERATIVO HUMANO DE ESTUDIAR EL COSMOS

Los primeros observadores del cielo seguramente no se plantearon el porqué miraban el cielo. Al observar la bóveda celeste descubrieron sin proponérselo el deambular diferenciado de estrellas, planetas, la Luna y el Sol, y los ciclos que gobiernan estos movimientos. Aprendieron a utilizar estos ciclos de manera práctica, al mismo tiempo que se cuestionaron la naturaleza de los astros, cuestiones cuyo significado llegó en ciertas épocas a determinar el curso de muchas vidas –como la de Giordano Bruno–. En la sociedad actual, mayormente inmersa en problemas relacionados con actividades cotidianas, no es inusual hacer un alto y plantear la cuestión de la utilidad de hacer astronomía, encontrando respuestas en varios niveles. Dos facetas de la curiosidad humana son la persistente búsqueda del conocimiento por parte del académico y la inquietud del gran público por entender los sorprendentes descubrimientos científicos. Como parte de la cultura humana, la astronomía aporta nociones particulares como nuestra ubicación en el tiempo y en el espacio, siempre inquietante y difícil de asimilar. Nos permite estudiar entornos irreproducibles en nuestros laboratorios y, dentro del quehacer humano, entendemos la utilidad de explorar estos entornos también en términos del desarrollo de tecnología innovativa que posteriormente puede encontrar sitio en la vida diaria. La astronomía conlleva un fuerte componente de formación de recursos humanos.

* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

¹ High Altitude Water Čerenkov.

El costo asociado con el desarrollo de infraestructura astronómica de frontera es visto generalmente como fuera del alcance de países como el nuestro. Debieron ser optimistas aquellos que abogaron porque México cuente con algún instrumento que le permita estar a la vanguardia en la investigación dentro del campo de la astronomía observacional, como sucedió en Tonantzintla en los años cuarenta y cincuenta; como buscó hacerlo Guillermo Haro en los años setenta; y como lo planteó Alfonso Serrano en los años noventa. Sólo siendo optimista pudo Alfonso Serrano concebir y llevar a cabo la construcción del Gran Telescopio Milimétrico (GTM) que hoy lleva su nombre, y que es descrito en estas memorias. Sólo imaginándose los impactos y estableciéndolos como metas. Y aún así, es improbable que haya previsto la instalación de un observatorio de rayos gamma de primera línea como una derrama del desarrollo del GTM y del sitio de Sierra Negra.

EL VOLCÁN SIERRA NEGRA Y SU DESARROLLO COMO SITIO ASTRONÓMICO

El volcán Sierra Negra, también llamado Tliltepetl (“*cerro negro*” en Náhuatl), fue elegido como el sitio del Gran Telescopio Milimétrico en febrero de 1997. El Tliltepetl es un volcán de casi 4600 m de altitud y más de 400 000 años de edad, de formación muy anterior a la del Citlaltepetl, con 5600 m la cumbre más alta de nuestro país. La distancia en línea recta entre ambas cimas es de tan sólo siete kilómetros de distancia (véase figura 1). Sierra Negra fue seleccionado como el sitio del GTM por el bajo contenido de vapor de agua que presenta, en particular en el invierno cuando las condiciones atmosféricas permiten observaciones en la banda sub-milimétrica. La ubicación geográfica de 19° de latitud Norte permite acceso tanto al cielo del hemisferio Norte, abundante en objetos extra galácticos, como a una fracción importante del cielo hemisferio Sur y al plano de la Vía Láctea. El desarrollo del volcán Sierra Negra como sitio astronómico requirió, en 1998, la apertura de un camino de acceso, la instalación de una línea de alimentación eléctrica, entre 1998 y 2003, y de una fibra óptica que permitiera un enlace eficiente de Internet –el cual aún no es adecuado para los experimentos del sitio–. La visibilidad

internacional del *GMT* fue un factor importante para que en el año 2006 se planteara la posibilidad de instalar un observatorio de rayos gamma de tipo *Čerenkov* de agua en Sierra Negra.



Crédito: INAOE.

Figura 1: Vista aérea del Pico de Orizaba (Citlaltepētli) enfrente del volcán Sierra Negra (Tlaltepētli), en cuya cima se encuentra el Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano*.

ASTRONOMÍA DE RAYOS GAMMA DESDE EL ESPACIO Y CON LA ATMÓSFERA TERRESTRE

Durante siglos la astronomía se basó en el estudio de la luz visible de los astros. En los últimos cincuenta años los científicos han aprendido a estudiar todo tipo de radiación proveniente del cosmos. La luz consiste de ondas electromagnéticas con la particularidad de ser visibles al ojo humano. Las ondas electromagnéticas puede distinguirse por la energía de los fotones asociados, medida comúnmente en electrón-voltios (eV). En esta escala los fotones de luz visible tienen energías entre 2 eV (luz roja) y 3 eV (luz azul). Los fotones ultravioleta, al tener energías de decenas o incluso centenares

de eV, pueden producir quemaduras en la piel. Los rayos X a su vez tienen energías que van hasta los cientos de miles de eV; generalmente traspasan tejido humano, por lo que son empleados para radiografías médicas, pero cuando son absorbidos pueden ser muy dañinos. La figura 2 representa el espectro electromagnético, las etiquetas en la parte superior indican la energía de los fotones, desde nano electrón volts, neV, hasta Peta electrón volts, PeV. En la parte inferior se denotan las frecuencias, desde las conocidas ondas de radio de Mega Hertz –MHz- a Tera Hertz –THz- hasta el infrarrojo cercano, μm . La línea horizontal negra representa la atmósfera, transparente para las ondas de radio y luz visible pero opaca a la radiación infrarroja, ultravioleta y a los rayos X y gamma.

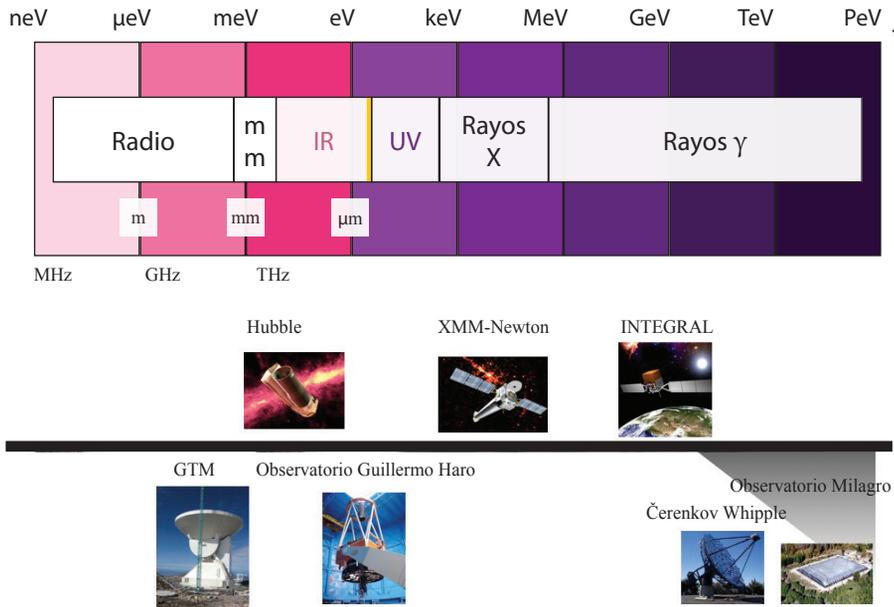


Figura 2: El espectro electromagnético y su aprovechamiento astronómico.

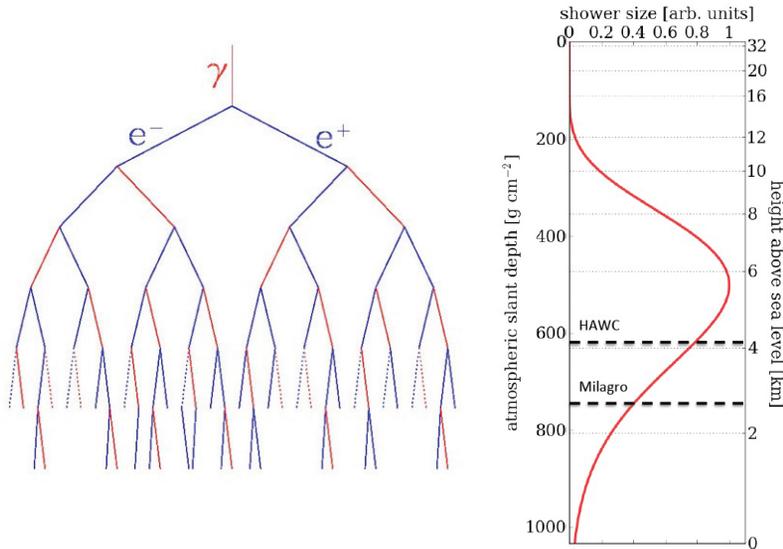
La radiación gamma (γ) fue descubierta al estudiar núcleos de átomos radiactivos. Tienen cientos de miles o incluso millones de eV, siendo considerablemente más penetrantes y dañinos que los rayos X. Los rayos γ son producidos por los desechos de plantas atómicas o en explosiones nucleares; también se usan de manera benéfica en tratamientos contra

enfermedades como el cáncer. Se ha comprobado, experimentalmente, que fotones con energías mayores a medio millón de electrón-volts pueden crear materia y anti-materia al materializarse en electrones y positrones, como lo predijera Dirac en los años veinte.

El empleo de diferentes tipos de radiación electromagnética para el estudio del cosmos marcó la segunda mitad del siglo xx. La atmósfera permite el paso de la luz visible, algunas bandas del espectro infrarrojo y las ondas de radio, por lo que las primeras extensiones de la astronomía fueron la astronomía infrarroja y radioastronomía, esta última a partir de los años cincuenta y sesenta. El estudio del cosmos en el infrarrojo lejano y en fotones de alta energía requirió el desarrollo de tecnología espacial y fue durante la década de los setentas que la NASA planeó el programa de los grandes observatorios espaciales, que terminarían siendo los telescopios espaciales *Spitzer* (infrarrojo), *Hubble* (visible), *Chandra* (rayos X) y el *Compton Gamma-Ray Observatory* (rayos gamma). En junio de 2008 fue lanzado el *Fermi γ -ray Space Telescope*, un telescopio mucho más poderoso que sus antecesores y capaz de detectar de varios miles de fuentes de fotones con energías de alrededor de 1 GeV (o 10^9 eV), ampliando nuestro conocimiento del universo visto en rayos gamma de energía media. El instrumento LAT (Large Area Telescope) de *Fermi* ha detectado diferentes clases de objetos tanto en la Vía Láctea (el Sol; varios tipos de pulsares; remanentes de supernova; novas), como fuera de ella (galaxias con formación estelar; núcleos activos de galaxias; destellos de rayos gamma).

La limitación en las dimensiones que pueden tener instrumentos como *Fermi*-LAT aunados a los bajos flujos de fotones de energías extremas hacen que el rango de energías detectables por este telescopio esté limitado a unos 100 GeV. Es afortunado que la atmósfera terrestre permite la observación de fotones de energías mayores. Un rayo gamma de muy alta energía, del orden de 1 TeV (10^{12} eV), es absorbido en la parte alta de la atmósfera al materializarse en un par electrón – positrón cerca de una molécula atmosférica, $\gamma \rightarrow e^- + e^+$. En este proceso la energía del fotón primario se reparte entre el electrón (e^-) y el positrón (e^+). Posteriormente, cada una de las partículas recién creadas genera a su vez un fotón al pasar cerca de otro núcleo atómico, perdiendo parte de su energía en una interacción conocida como

bremsstrahlung, $e^+ \rightarrow e^- + \gamma$. Estas reacciones provocan una *cascada electromagnética* que se desarrolla inicialmente de manera exponencial (véase la figura 3) mientras la energía de cada partícula involucrado esté por encima de unos 80 MeV.



Crédito: INAOE.

Figura 3: A la izquierda, el esquema de una cascada electromagnética con un fotón primario produciendo un par electrón-positrón, que a su vez emiten fotones secundarios por *bremsstrahlung*. A la derecha el desarrollo de la cascada en la atmósfera, con el máximo a unos 6000 m de altitud.

Cuando las partículas secundarias empiezan a tener energías por debajo de este umbral, el número de partículas en la cascada deja de crecer y ésta empieza a atenuarse (véase la figura 3). Los rayos cósmicos, partículas cargadas de muy alta energía provenientes del espacio, generan cascadas de partículas más complejas al involucrar interacciones nucleares y la producción de una mayor variedad de partículas, como los muones. La detección de muones sirve para diferenciar la cascadas atmosféricas iniciadas por rayos cósmicos (cascadas con muones) de aquellas iniciadas por rayos γ (cascadas sin muones) cuando son absorbidos pueden ser muy dañinos. La figura 2 representa el espectro electromagnético, las etiquetas en la parte

superior indican la energía de los fotones, desde nano electrón volts, neV, hasta Peta electrón volts, PeV. En la parte inferior se denotan las frecuencias, desde las conocidas ondas de radio de Mega Hertz –MHz- a Tera Hertz –THz- hasta el infrarrojo cercano, μm . La línea horizontal negra representa la atmósfera, transparente para las ondas de radio y luz visible pero opaca a la radiación infrarroja, ultravioleta y a los rayos X y gamma.

DETECTORES ČERENKOV DE AGUA: DE MILAGRO A HAWC

La detección y caracterización de las cascadas atmosféricas de partículas es posible gracias a la radiación Čerenkov que se produce cuando una partícula cargada viaja más rápido que la velocidad de la luz en un medio, la cual es igual a c/n para un medio con índice de refracción n . El índice de refracción del aire, $n \approx 1.0003$, permite que electrones con energías superiores a unos 20 MeV emitan radiación Čerenkov, condición que se cumple fácilmente a lo largo del desarrollo de una cascada atmosférica. Esta propiedad hace que sea posible la detección de cascadas electromagnéticas usando telescopios que detectan la luz Čerenkov producida de las partículas que se mueven más rápido que la luz en el aire. Estos telescopios, denominados “telescopios Čerenkov atmosféricos”, funcionan de manera óptima en pares o en arreglos.

Los principales instrumentos de este tipo a nivel mundial son los telescopios MAGIC, en las Islas Canarias; el arreglo VERITAS en Arizona; y el sistema HESS, en Namibia. Los grupos que llevan estos instrumentos se han unido en la iniciativa del Čerenkov Telescope Array (CTA), propuesta que representa un avance en sensibilidad de no menos de un orden de magnitud con respecto a los instrumentos actuales. El proyecto CTA contempla dos arreglos ocupando uno o dos kilómetros cuadrados, uno en el Hemisferio Norte y otro en el Sur. Dentro de los sitios candidatos para la instalación Norte del CTA figura San Pedro Mártir, en Baja California, sede del Observatorio Astronómico Nacional.

Los observatorios Čerenkov de agua se basan en la detección directa de partículas de la cascada atmosférica al penetrar éstas el detector. El agua es

un medio idóneo para la detección de partículas de alta energía por su alto índice de refracción, $n \approx 1.33$, que garantiza la producción de radiación por cualquier partícula de la cascada. Incluso fotones secundarios son detectados al producir estos un par e^\pm que emite radiación Čerenkov. La técnica Čerenkov de agua fue instrumentada en los años sesenta en el arreglo de rayos cósmicos de *Haverah Park*, siendo el observatorio *Milagro* el primero en emplear esta técnica con la capacidad de distinguir cascadas hadrónicas de las fotónicas para el estudio de fuentes celestes de radiación γ .



Foto: Colaboración Milagro.

Figura 4: El observatorio *Milagro*, primer detector astronómico en emplear la técnica Čerenkov de agua. Las marcas rojas indican la posición de los tanques periféricos.

Milagro estaba constituido por un estanque de $50\text{ m} \times 80\text{ m}$ instrumentado con 723 tubos fotomultiplicadores, rodeado de 175 tanques de pequeñas dimensiones instrumentados cada uno con un tubo fotomultiplicador (véase la figura 4). Estaba ubicado en Nuevo México, a una altitud de 2580 m, operando entre 1999 y 2008. Milagro compiló un mapa de 55% de la bóveda celeste descubriendo la emisión de fotones con energías de TeV de varios objetos astronómicos, como la Nebulosa del Cangrejo, la región de Cygnus y la fuente MGRO J1908+06, cuyo espectro alcanza energías de hasta 100 TeV (véase la figura 5).

La iniciativa de desarrollar el “*High Altitude Water Čerenkov (HAWC) γ -ray observatory*” fue presentada por la colaboración *Milagro* a varias instituciones de México en el año 2006. La propuesta establecía que un detector con dimensiones de unos 150 m y un diseño optimizado situado

por encima de 4000 m de altitud sería capaz de detectar fuentes 15 veces más débiles que las halladas por *Milagro*. Este detector podría ubicarse en México, Bolivia o el Tíbet, siendo favorecida en julio de 2007 la propuesta del grupo mexicano de instalar *HAWC* en la base del volcán Sierra Negra.

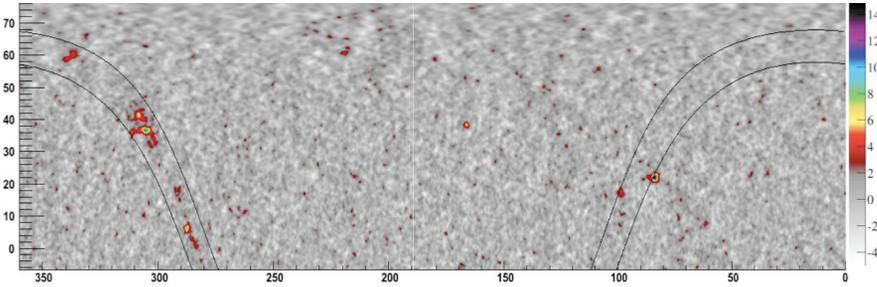


Foto: Colaboración Milagro.

Figura 5: Mapa del cielo obtenido por *Milagro* en operación entre 1999 y 2008. El mapa está en coordenadas celestes, con el plano de la Galaxia indicado por las líneas negras. Se distingue la región de Cygnus y MGRO J1908+06 (lado izquierdo), además del Cangrejo y Geminga (lado derecho).

La posición más cercana al ecuador le permite a *HAWC* cubrir dos tercios de la bóveda celeste cada día sideral.

El proyecto *HAWC* contempla la instalación de 300 detectores *Čerenkov* de agua individuales, de 7.2 m de diámetro y casi 5 m de altura, con 180000 litros de agua en condiciones de oscuridad e instrumentados con cuatro tubos fotomultiplicadores cada uno. A principios de 2013 se había instalado 15% del arreglo, el cual ya era funcional y había obtenido sus primeros resultados: la detección de la sombra de la Luna sobre el fondo de rayos cósmicos, y la medición de la anisotropía en la distribución espacial de los rayos cósmicos a energías de alrededor de 1 TeV. A mediados de 2013 alrededor de 40% del arreglo estaba funcional o en proceso de instalación (véase la figura 6), con la puesta en operación formal programada para agosto de 2013 y la meta de completar los trescientos detectores individuales a finales de 2014. El proyecto considera 10 años de operación y por tanto un trabajo de colaboración binacional trazado hasta finales de 2024. El proyecto *HAWC* ha sabido atenerse al presupuesto y los tiempos estipulados ante las agencias financiadoras, el Conacyt, la NSF y el DOE.

La sensibilidad de *HAWC* una vez completado el arreglo se caracteriza por la detección de la Nebulosa del Cangrejo con una señal a ruido de 5 en un tránsito individual. Bajo esta premisa, el caso científico de *HAWC* considera: el mapeo de dos tercios de la bóveda celeste a energías de entre 100 GeV y 100 TeV a una nivel de 40 mili-Crabs; el monitoreo diario de fuentes episódicas y la búsqueda de emisión en TeV de *gamma-ray bursts* (GRBS); y el catálogo y la caracterización de las fuentes detectadas en varias etapas del proyecto. Recientemente fue aprobada la extensión de la operación del telescopio espacial de rayos *Fermi*, funcional en la banda de 100 MeV a 100 GeV, bajo la consideración de un traslape en su operación con *HAWC*.



Crédito: INAOE.

Figura 6: El observatorio *HAWC* a finales de abril 2013, con poco menos de 100 detectores individuales instalados. El arreglo completo de 300 tanques ocupará toda la plataforma.

LA OPORTUNIDAD DE *HAWC*

La oportunidad de instalar *HAWC* en México se dio gracias a varios factores, entre los que destacan la existencia de una comunidad académica suficientemente madura en nuestro país, y la presencia de un sitio de gran altitud con

infraestructura previamente desarrollada. Es correcto afirmar que el involucramiento de México a nivel protagónico en *HAWC* es una derrama inesperada del *GTM*, que convirtió al volcán Sierra Negra en un sitio con visibilidad mundial y atractivo para instrumentos que se beneficien de condiciones de gran altitud o una ubicación geográfica cercana al ecuador. En esa misma línea, *HAWC* representa una capitalización adicional de la inversión realizada en el desarrollo del camino, la línea eléctrica y la fibra óptica del *GTM*, cuyo costo fue estimado en 2.3 millones de dólares en 2003. La extensión de esta infraestructura al sitio de *HAWC* se hizo con un costo muy por debajo y en un tiempo muy inferior al requerido para un sitio nuevo.

El observatorio de rayos gamma *HAWC* es un proyecto binacional entre México y Estados Unidos, una colaboración amplia que involucra cerca de treinta instituciones, con una inversión de poco más de 12 millones de dólares, modesta en la escala internacional, y de alto impacto científico, y consecuentemente con un importante retorno en relación a la inversión.

El proyecto representa una gran oportunidad para la formación de recursos humanos y el desarrollo de grupos académicos competitivos en instituciones ubicadas en lugares como Chiapas o Hidalgo. Aún así el proyecto tiene riesgos: el alto grado de focalización de los grupos líderes en ocasiones se contrapone al desarrollo de grupos más incipientes, siendo que una de las justificaciones de estos proyectos en nuestro país es el desarrollo de nuevos grupos. Carecemos en México de mecanismos ágiles para el apoyo de grupos emergentes, y no siempre existe una actitud generosa de los grupos consolidados. Aun así, el proyecto ha sabido avanzar bajo metas comunes, cimentando una amplia colaboración binacional entre México y Estados Unidos que conjunta más de cien integrantes en un proyecto que ya ha comenzado a rendir frutos.

Instituciones integrantes del Proyecto HAWC

<i>México</i>	<i>Estados Unidos</i>
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica	University of Maryland
Universidad Nacional Autónoma de México	Los Alamos National Laboratory
Instituto de Astronomía	Colorado State University
Instituto de Ciencias Nucleares	George Mason University
Instituto de Física	Georgia Institute of Technology
Instituto de Geofísica	Michigan State University
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	Michigan Technological University
Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN	NASA Goddard Space Center
Instituto Politécnico Nacional	Pennsylvania State University
Universidad Autónoma de Chiapas	The Ohio State University
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo	University of Alabama
Universidad de Guadalajara	University of California Santa Cruz
Universidad de Guanajuato	University of California Irvine
Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo	University of New Hampshire
Universidad Politécnica de Pachuca	University of New Mexico
	University of Utah
	University of Wisconsin

CONCLUSIONES

Los ejemplos anteriores de proyectos terminados o en curso ilustran claramente la seguridad que se puede obtener a través de desarrollos chicos a medianos en plazos comparables, para que todas las partes: academia, industria y gobierno esten convencidas de que hacer proyectos mayores es seguro, posible y de beneficio amplio para diversos sectores. Por otro lado, diversificar los proyectos, en temática y escala, los vuelve complementarios

(por ejemplo, en lo anterior están cubiertas las longitudes de onda que van desde los rayos gamma hasta el milimétrico), reduce el riesgo individual de cada proyecto, y maximiza las posibilidades de participación de individuos e instituciones académicas e industriales, así como de fuentes de financiamiento del sector público y privado, nacional y externo.

Un aspecto fundamental en el desarrollo a futuro es acoplar las inversiones en infraestructura con la formación de personal. Las escalas típicas de diseño y construcción de un proyecto chico a mediano son comparables con las de un posgrado (maestría y doctorado), de manera que es crucial hacer una planeación dirigida, para que al término de las etapas de fabricación y entrada la fase de operación y explotación, contemos con el personal que pueda aprovechar al máximo el esfuerzo ya realizado.

La astronomía mexicana está plenamente inserta en el contexto internacional, y es permaneciendo y fomentando aún más la interacción que podremos aprovecharla al máximo. De las contribuciones aquí expuestas se puede apreciar que resta mucho trabajo por hacer para convertir a la astronomía en una disciplina que en cantidad y masa crítica de profesionales, y en distribución en el territorio nacional, sea comparable con lo que ocurre en países desarrollados. Pero lo fundamental, a saber: los sitios para hacerlo, el personal para llevarlos a cabo, y la infraestructura básica para ello, está ahí. Es momento de aprovecharlo para beneficio de todos.



SEMBLANZAS DE LOS AUTORES

Itziar Aretxaga

Nació en Bilbao, España. Obtuvo la licenciatura en física por la Universidad Complutense de Madrid, España en 1988 y realizó su doctorado en física por la Universidad Autónoma de Madrid. Desde 1998 trabaja en México como investigadora en el área de astrofísica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE. Sus principales líneas de investigación se enmarcan en el área de la astrofísica extragaláctica y cosmología. Su interés principal es la relación entre la actividad energética del centro de las galaxias (quásares) y la formación violenta de brotes estelares y el impacto que estos fenómenos tienen en la formación de las galaxias. De los proyectos en los que participa, destacan el Proyecto de Ciencia Básica Conacyt “Propiedades físicas de *starbursts maximales* en galaxias en formación y quásares”, (2012-), *CanariCam*, cámara infrarroja del 10.4m GTC; equipo científico “Imagen y espectroscopía en el infrarrojo medio de núcleos galácticos activos cercanos”, *AzTEC*, “cámara bolométrica de 50m” GTM, equipo científico: “Evolución de galaxias en ondas milimétricas”, *Herschel-ATLAS*, *Herschel Astrophysical Terahertz Large Area Survey*, coinvestigadora y *SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey*.

Héctor Bravo Alfaro

Nació en Puebla en 1966, realizó sus estudios de licenciatura en física por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y de doctorado en ciencias en 1997 por la Universidad de Paris en el *Observatoire de Paris-Meudon* en Francia. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Profesor de licenciatura, maestría y doctorado en astrofísica en la Universidad de Guanajuato. Fue coordinador del posgrado en astrofísica de la Universidad de Guanajuato y fue responsable de la modernización del Observatorio Astronómico de la universidad, y del centro para la divulgación de la ciencia, el cual coordina.

Vicente Bringas Rico

Nació en Querétaro. Es egresado de ingeniería mecánica con especialidad en seguridad y dinámica de automóviles por el *Japan Automobile Research Institute* de Tsukuba, Japón. Realizó estudios de maestría en Ciencias con especialidad de Diseño y Desarrollo de Sistemas Mecánicos y de doctorado en Diseño Mecánico. Trabajó por diez años para la industria privada en las ramas automotriz y de maquinaria pesada, en temas de manufactura, diseño y pruebas de componentes. Desde 1990 trabaja para el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) dirigiendo grupos de desarrollo de proyectos I+D+i de diseño de equipo y líneas de manufactura para la industria privada. Actualmente ocupa el puesto de director de Instrumentación Científica. Desde el año 2000 dirige, por parte del CIDESI, proyectos conjuntos con el Instituto de Astronomía de la UNAM para la instrumentación de telescopios entre los que se encuentran el *Commissioning Instrument*, *OSIRIS*, y *FRIDA* para el *GTC* y para el desarrollo del telescopio *SPMT* en Baja California.

Alberto Carramiñana

Nació en la Ciudad de México en 1961. Estudió la licenciatura en física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Obtuvo su doctorado en astronomía de rayos gamma por la Universidad de Durham, Inglaterra y posteriormente realizó una estancia posdoctoral en la Agencia Espacial Europea. Su investigación se ha centrado en el estudio de fuentes de rayos gamma, con contribuciones adicionales en otros campos de la astrofísica. Su labor de divulgación científica ha sido reconocida con el premio estatal de Ciencias. Desde octubre de 1993 es investigador en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, INAOE en la Coordinación de Astrofísica de la cual fue coordinador de Astrofísica. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, de la Academia Mexicana de Ciencias, de la Red de Física de Altas Energías de Conacyt y fue representante de México ante la Unión Astronómica Internacional. Desde 2006 ha sido el responsable por México en la colaboración *HAWC*, dedicada a la instalación de un observatorio de rayos gamma en el volcán Sierra Negra. Director general del INAOE para el periodo 2011-2016.

J. Jesús González González

Estudió la carrera de física en la Facultad de Ciencias de la UNAM; realizó más tarde sus estudios de maestría y de doctorado en la Universidad de California Santa Cruz. Sus principales áreas de trabajo son: Estudio de las poblaciones estelares en galaxias, así como la cinemática y composición química de las estrellas en galaxias; instrumentación astronómica. Desde 1998 se dedica al diseño y construcción de grandes telescopios y su instrumentación, tanto para el Gran Telescopio Canarias (España) como para el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir (SPM). Entre los proyectos actuales está el desarrollo de un telescopio de 6.5 m para SPM. Su trabajo se ve reflejado en la dirección de varios proyectos de instrumentación de alta tecnología para observaciones astronómicas, el último de los cuales, de nombre OSIRIS, se diseñó para el Gran Telescopio de Canarias, en España. Es Investigador en el Instituto de Astronomía y profesor de licenciatura y posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

David H. Hughes

Nació en Escocia donde estudió la licenciatura en astronomía y astrofísica en la Universidad de St. Andrews en 1986. Obtuvo el doctorado en la Universidad Central Lancashire, Inglaterra en 1990. Al finalizar los posdoctorados en las universidades de Oxford y Edimburgo, llegó al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica INAOE en 1999 para contribuir al proyecto Gran Telescopio Milimétrico. Sus principales líneas de investigación son la cosmología observacional, la instrumentación milimétrica, la formación y evolución de galaxias, los núcleos activos de galaxias y los cúmulos de galaxias. Algunos de los proyectos más relevantes en los que ha participado son: “*The Evolution of Structures in the High-Redshift Universe*”, *Observing the Extended Growth Strip (EGS) at millimeter wavelengths*; *Designing a Large Millimeter Telescope. Latin American Chinese European Galaxy Formation Network, LACEGAL*, Gran Telescopio Milimétrico, GTM. En 2010 recibió el Premio *Scopus*, que otorgan el Grupo Editorial Elsevier y el Conacyt anualmente a investigadores sobresalientes de nuestro país. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, de la Unión Astronómica Internacional y del Sistema Nacional de Investigadores. Desde agosto de 2011 funge como director e investigador principal del Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano*.

William Lee

Nació en la Ciudad de México en 1969. Egresado de la carrera de física de la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde obtuvo la medalla Gabino Barreda en 1992. Cursó la maestría y doctorado en física en la Universidad de Wisconsin, Madison, Estados Unidos. En 1998 se incorporó al Instituto de Astronomía de la UNAM, donde es investigador desde 2006. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel II. Su línea de estudio se puede dividir en tres líneas de investigación, cada una de ellas con un impacto importante: la fusión de estrellas de neutrones y agujeros negros; los destellos de rayos gamma, y las oscilaciones en discos de acreción. Ha realizado aportaciones sustanciales al entendimiento de los destellos de rayos gamma cosmológicos y las fuentes que los producen; del estudio de las binarias de rayos X en nuestra galaxia; de las fusiones de objetos compactos; de la generación de ondas gravitacionales y sus implicaciones para la ecuación de estado de la materia a densidades nucleares. Es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y de la Unión Astronómica Internacional. Es director del Instituto de Astronomía de la UNAM para el periodo 2010-2014.

Laurent Loinard

Nació en París, Francia en 1970. Obtuvo la licenciatura en física en la Universidad *Joseph Fourier de Grenoble* en 1992, y en 1998 el doctorado en astrofísica en la misma universidad. Su trabajo doctoral, sin embargo, fue desarrollado principalmente en el Centro de Astrofísica de la Universidad Harvard en Cambridge, Massachusetts y en el Instituto del Telescopio Espacial en Baltimore, Maryland. En el año 2000 ingresó como Investigador al Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México en el Campus Morelia, donde es profesor de astronomía. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores en el nivel II. Su principal línea de investigación es sobre la formación y la juventud de las estrellas, usando observaciones en las bandas infrarrojas y radio del espectro electromagnético. Entre sus principales contribuciones, cabe señalar el papel activo que jugó en la comprensión de la química peculiar que se desarrolla en protoestrellas de baja masa, así como su liderazgo a nivel internacional en el estudio de la dinámica de sistemas estelares jóvenes. En los últimos años ha encabezado un importante proyecto de investigación que le ha permitido determinar la distancia a estrellas jóvenes en la vecindad solar con una precisión extrema. En 2007 recibió la Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos en el área de investigación en ciencias básicas.

Manuel Peimbert

Nació en la Ciudad de México en 1941. Realizó sus estudios profesionales en la Facultad de Ciencias de la UNAM, y doctorales en el departamento de Astronomía en la Universidad de California en Berkeley. En 2011 fue nombrado *Doctor Honoris Causa* por la UNAM. Sus aportes científicos más significativos han sido en el campo de la determinación de abundancias químicas de las nubes de gas de donde se forman las estrellas, y del material que arrojan algunas estrellas en nuestra Galaxia y otras galaxias, así como su aplicación al estudio de la evolución química de estos sistemas y del Universo en su conjunto. Es miembro extranjero de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NAS). Miembro Asociado de la Real Sociedad Astronómica de Inglaterra; de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo; de la Academia de Ciencias de América Latina; de la American Philosophical Society. Pertenece a la Junta de Gobierno de la UNAM, a El Colegio Nacional y al Consejo Consultivo de Ciencias. Recibió el Premio Nacional de Ciencias y Artes; el premio de Ciencias de la Academia de la Investigación Científica Arturo Rosenblueth; Premio Universidad Nacional de Ciencias Exactas; Medalla Académica de la Sociedad Mexicana de Física; Medalla Guillaume Budé del Collège de France; Medalla de la Academia de Ciencias del Tercer Mundo. Es Investigador Emérito en el Instituto de Astronomía y profesor en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Luis Felipe Rodríguez Jorge

Pionero de la radioastronomía en México, descubrió la primera fuente superlumínica en nuestra Galaxia. Nació en Mérida, Yucatán en 1948. Estudió física en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México y el doctorado en astronomía en la Universidad Harvard. Desde 1979 es investigador titular del Instituto de Astronomía de la UNAM. El trabajo realizado en los últimos 20 años por él y sus colaboradores en el área de formación estelar es considerado de punta mundialmente y no es exagerado afirmar que el conocimiento de los procesos que caracterizan la formación estelar debe mucho a sus aportaciones. Su investigación se centra en el nacimiento y juventud de las estrellas, así como sobre los sistemas binarios de rayos X, áreas en las que ha realizado contribuciones fundamentales al saber universal. Fundador, investigador Emérito y primer director del Centro de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM en Morelia, Michoacán. Investigador Nacional de Excelencia del Sistema Nacional de Investigadores y miembro del Consejo Consultivo de Ciencias y de El Colegio Nacional.



LÍNEAS DE ACCIÓN PARA EL FUTURO DE
la Astronomía y la Astrofísica
en México



Alianza interinstitucional para el desarrollo de la astronomía en México

Propósito	Posicionar la investigación científica en astronomía que se desarrolla en el país al más alto nivel en el ámbito internacional. Atraer a científicos y técnicos así como inversiones de otros países para potenciar la ciencia mexicana, derivar instrumentos y tecnologías hacia otros campos y acelerar los procesos de formación de capacidad.
Antecedentes	México cuenta con sitios de observación astronómica atractivos para científicos destacados en otros países, con los cuales se han realizado o están realizando proyectos que podrían representar oportunidades para la formación de nuevos investigadores mexicanos, el fortalecimiento de grupos y la habilitación y utilización de nueva infraestructura compartiendo costos de inversión.
Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • Se propone conformar una alianza entre las principales instituciones activas en investigación en astronomía en la que éstas comprometan recursos para el diseño de un programa cooperativo de investigación, formación de capacidad, utilización eficiente de la infraestructura y colaboración con instituciones y especialistas internacionales. • En una primera aproximación se integraría un Grupo de Tarea con una misión y un tiempo establecidos, al que se encargaría la formulación de un Programa de Desarrollo con metas definidas. • A partir de la identificación de grupos internacionales interesados y sus demandas específicas potenciales procedería al levantamiento de un inventario de capacidad instalada y a un diagnóstico preliminar de las necesidades de fortalecimiento de los sitios y los grupos mexicanos para hacerlos más atractivos. • El producto final de este proceso sería una propuesta de plan de trabajo conjunto que especificaría además las acciones necesarias para la promoción, la obtención de recursos, coordinación de esfuerzos y seguimiento del avance. • Una vez elaborado se distribuiría entre los interesados en busca de su consenso y se establecería de común acuerdo una instancia interinstitucional más permanente que sería la responsable de su realización y seguimiento.

Impacto potencial	<ul style="list-style-type: none"> • Se incrementaría la cooperación con grupos internacionales de alto nivel y por tanto la proyección de nuestros científicos. • Se fortalecerían los grupos existentes en instituciones del interior del país que han comenzado a consolidarse. • Se enriquecerían tanto la infraestructura de las instituciones como el rendimiento de las inversiones. • Se daría ocasión al desarrollo de capacidad en ingeniería, instrumentación y equipamiento por parte de firmas mexicanas.
Instituciones participantes	UNAM, INAOE, U Guanajuato, U Guadalajara, U Sonora, IPN.
Tiempo estimado	<p>La elaboración de la propuesta de plan de trabajo conjunto y su concertación entre las partes tomaría unos 4-6 meses.</p> <p>Las acciones cooperativas a las que daría lugar cubrirían seguramente varios años y quizá prolongarse indefinidamente.</p>
Recursos necesarios	<p>Las principales instituciones participantes comisionarían algunas personas al Grupo de Tarea por el tiempo necesario y, una vez concertado el Plan de Desarrollo, comprometerían recursos de sus presupuestos ordinarios. Articularían un Portafolio de Proyectos y una estrategia de levantamiento de fondos.</p> <p>Las necesidades de personal formado darían lugar a la negociación de paquetes de becas, estancias, programas posdoctorales, cuyo financiamiento quedaría bajo la responsabilidad de cada institución.</p> <p>El desarrollo a largo plazo del programa requeriría recursos considerables, que se negociarían en su momento con las instancias y organismos nacionales e internacionales pertinentes.</p>

Fortalecimiento y proyección del Observatorio Astronómico Nacional de San Pedro Mártir (OAN-SPM) y el *San Pedro Mártir Telescope* (SPMT)

Propósito	<p>Maximizar el aprovechamiento de las ventajas naturales del sitio y de la colaboración ya existente entre la UNAM, el INAOE, la Universidad de Arizona (UA) y el <i>Smithsonian Astrophysical Observatory</i> (SAO) a partir de la creación de un Observatorio Binacional México-Estados Unidos.</p> <p>Atraer a científicos internacionales e incorporar a nuestro país en áreas tecnológicas de avanzada.</p>
Antecedentes	<p>La UNAM, el INAOE, la UA y el SAO han emprendido conjuntamente la construcción de un nuevo telescopio óptico-infrarrojo de campo amplio de de 6.5m (SPMT), similar al que ya operan la UA y el SAO en <i>Mt Hopkins</i>, Arizona (MMT), lo que les permitirá usar instrumentación disponible que requiere un cielo más oscuro que el de <i>Mt Hopkins</i> y así aprovechar mejor su inversión.</p> <p>Existe un acuerdo en cuanto a las aportaciones de cada una de las instituciones y conforme al modelo del telescopio que se usará. El diseño de detalle de éste como los del edificio, cúpula y servicios se realizarán en estrecha colaboración entre instituciones mexicanas y de Estados Unidos. La UNAM aportará el sitio dentro de SPM y su infraestructura.</p>
Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • La disponibilidad de los nuevos equipos e infraestructura previstos impone al OAN-SPM la necesidad de anticipar su debida utilización. • Se propone establecer un consorcio virtual entre instituciones nacionales y de otros países dirigido al doble propósito de elaborar un programa compartido de observación astronómica e investigación espacial y estimar la distribución entre las partes de las inversiones, instrumentos y equipamiento necesarios. • Se aprovecharán contactos y relaciones de cooperación existentes, las cuales se formalizarán mediante convenios de mediano y largo plazo con compromisos específicos de inversión, formación de capacidad y utilización de las instalaciones. • Para el diseño del telescopio SPMT propiamente, ya se cuenta con los estudios de factibilidad y el diseño conceptual.

Impacto potencial	<ul style="list-style-type: none"> • El acceso a dos telescopios de 6.5m es muy relevante para potenciar y complementar la investigación centrada hasta ahora en telescopios gigantes. • Aumentaría la interacción de los investigadores mexicanos con dos instituciones norteamericanas de reconocido prestigio en investigación, desarrollo y formación de recursos humanos. • Una fracción importante de la derrama tecnológica y económica del proyecto se atendería desde México. • Los recursos públicos nacionales rendirían más en términos de talento e infraestructuras mejor aprovechadas y más productivas.
Instituciones participantes	UNAM, INAOE, Universidad de California, Universidad de Arizona, <i>Smithsonian Astrophysical Observatory</i> , Universidad de Guanajuato, Universidad de Guadalajara, Universidad de Sonora, ESFM/Instituto Politécnico Nacional, CIDESI-Conacyt.
Tiempo estimado	<p>La construcción y puesta en servicio del SPMT tomaría unos 5 años, a lo largo de los cuales podrían realizarse las acciones de concertación de programas de más largo plazo.</p> <p>Una vez puesto en servicio, el telescopio SPMT tendrá una vida útil de aproximadamente 30 años.</p>
Recursos necesarios	La inversión requerida para la construcción y puesta en servicio del SPMT se estima en 70 millones de dólares a lo largo de los próximos cinco años. El Conacyt ya ha aprobado fondos para la primera etapa de diseño preliminar, y es necesario garantizar las aportaciones subsecuentes durante todo este plazo.

Terminación del Gran Telescopio Milimétrico *Alfonso Serrano*, y establecimiento y operación del Observatorio Nacional del Gran Telescopio Milimétrico (ON-GTM)

Propósito	Establecer y operar el ON-GTM, instancia encargada de la operación y mantenimiento del Gran Telescopio Milimétrico <i>Alfonso Serrano</i> (GTM). Establecer un Plan de Instrumentación del GTM abierto a la comunidad científica nacional.
Antecedentes	El proyecto GTM inició en 1994, culminando con la primera luz del telescopio en la banda milimétrica en 2011. La primera ronda de observaciones científicas en 2013 marcó el arranque de la operación del telescopio con la apertura limitada a 30m. Actualmente se desarrolla el Plan de Terminación del GTM que contempla alcanzar la apertura de diseño de 50m y las especificaciones originales a principios de 2016.
Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • La propuesta plantea: (1) la terminación del telescopio; (2) su operación a largo plazo; (3) implementar un plan de instrumentación abierto a la comunidad científica mexicana, y apoyar la operación a largo plazo del telescopio.
Impacto potencial	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidar al GTM como la mayor antena milimétrica del mundo, capaz de realizar observaciones astronómicas únicas. La operación y explotación científica del GTM en beneficio de las comunidades científicas mexicana y de la Universidad de Massachusetts. El desarrollo de nueva instrumentación por parte de la comunidad científica mexicana para optimizar la participación de la misma y el retorno científico del telescopio.
Instituciones participantes	La responsabilidad de la operación de ON-GTM recae en el INAOE. El Plan de Instrumentación sería abierto a todas las instituciones mexicanas interesadas. La Universidad de Massachusetts participa en las actividades de la propuesta como socio.
Tiempo estimado	<p>El ON-GTM puede establecerse en 2014, siendo que el telescopio ya opera, o hasta 2016, una vez terminado. Se plantea establecer el Plan de Instrumentación en 2014 con un plazo de dos años para el desarrollo de instrumentos que aprovechen la apertura final de 50 metros de diámetro.</p> <p>En cuanto a la operación, el tiempo nominal de vida del GTM es de 30 años.</p>

Recursos
necesarios

El Plan de Terminación del GTM contempla un presupuesto total de 150 millones de pesos (más IVA e impuestos de importación) a ejercer entre 2013 y 2015. De estos recursos 47.2 millones ya fueron erogados en 2013; se busca poder contar con un apoyo por 70 millones de pesos por parte de Conacyt en 2014; y quedarían pendientes alrededor de 35 millones de pesos en 2015.

La operación requiere de alrededor de 70 millones, de los cuales el INAOE cuenta con un presupuesto anual y regularizable de 53.5 millones. Faltan 16. El presupuesto puede incluir 2 millones de pesos para apoyar la operación anual del sitio de *HAWC*, experimento que comparte infraestructura de base con GTM.

Finalmente, se propone un Plan de Instrumentación por 15 millones de pesos a dos años, dirigido a la comunidad científica nacional en pleno.

Consolidación y proyección del Observatorio de Altas Energías en Sierra Negra, Puebla (HAWC)

Propósito	Contribuir a la conclusión oportuna del proyecto ejecutivo del HAWC, la integración y desarrollo de su organización operativa.
Antecedentes	La iniciativa HAWC, originada en 2006-2007, resulta de la cooperación entre Estados Unidos y México liderado por Los Álamos National Laboratory, la Universidad de Maryland, el INAOE y la UNAM, en la que participan además una docena de instituciones en ambos países. Se encuentra en fase de construcción. Ha contado con financiamiento de la NSF y el DOE de Estados Unidos, CONACYT y la UNAM.
Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto está en marcha en el volcán Sierra Negra, sitio a cargo del INAOE. Contempla el diseño, fabricación y operación de un observatorio de Altas Energías mediante detección de radiación secundaria en 300 detectores, 70 de los cuales ya han sido instalados y los restantes se han programado para 2014. La selección de la contraparte mexicana implica un importante compromiso de nuestro país a nivel internacional, ya que se considera que no existe otro observatorio en el mundo con las características del HAWC. • Las instituciones mexicanas participantes asumirán la responsabilidad por su operación al menos durante 10 años. Gozarán también, por otra parte, de la oportunidad de desarrollar proyectos propios. • Deberán contar con personal capacitado y en desarrollo. Se propone elaborar en colaboración entre el INAOE, la UNAM y el CONACYT un Plan para el entrenamiento, la preparación y la formación de un cuadro de gestión técnica y operativa del proyecto que contemple al personal tanto académico como administrativo que tendrá a su cargo la operación continua del observatorio.
Impacto potencial	<ul style="list-style-type: none"> • Se aprovecharían y proyectarían mejor las ventajas naturales del sitio. • Se contaría con el respaldo continuado, como aliados, de organizaciones internacionales destacadas. • Los recursos públicos nacionales rendirían más en términos de talento e infraestructuras mejor aprovechadas y más productivas. • Se contribuiría al desarrollo de proveedores y firmas de ingeniería aptas para atender requerimientos del consorcio.
Instituciones participantes	Laboratorio Los Álamos, Universidad de Maryland, INAOE, UNAM, Conacyt.

Tiempo estimado	<p>La elaboración del Plan de formación de personal, que supone un acuerdo previo entre las instituciones participantes, podría requerir hasta 12 semanas.</p> <p>Su plena realización podría requerir varios años e implicaría tanto actividades educativas y formativas explícitas como formación en el trabajo supervisada por personal con experiencia, sobre todo en el extranjero.</p>
Recursos necesarios	<p>Los fondos necesarios para concluir el proyecto ejecutivo en marcha se han estimado en unos 15 millones de dólares, 4 de los cuales serán aportados por las instituciones mexicanas participantes.</p> <p>La realización del Plan de formación implicará selección e inducción de candidatos, diseño de programas individualizados, estudios, viajes, estancias en otras instituciones o en otros países. Los gastos asociados serían cubiertos por las instituciones participantes.</p>

Participación de México en el proyecto CTA en Astronomía de Altas Energías

Propósito	Participar en el diseño, fabricación y operación de un observatorio de altas energías mediante la detección de radiación en arreglos múltiples de telescopios ópticos a fin de asegurar la asimilación de técnicas de ingeniería, procesamiento de datos e información, construcción y operación de sistemas ópticos, comunicación y transmisión de información en beneficio del desarrollo tecnológico de nuestro país.
Antecedentes	El proyecto es una colaboración internacional de más de 25 países, entre ellos México. Se encuentra en fase de diseño, estudio y selección de sitios.
Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • Instituciones de nuestro país han venido participando en la iniciativa CTA prácticamente desde su origen. Consiste en la instalación de conjuntos de telescopios que detectan la luz Cerenkov de distintas dimensiones y su operación simultánea para lograr observaciones con 10 veces mayor sensibilidad que la alcanzada hasta ahora. Se ha propuesto concentrar capacidades enlazadas entre sí en dos ubicaciones: una en el hemisferio norte y la otra en el sur. El OAN-SPM se menciona como posible candidato para la primera. La complementariedad con el <i>HAWC</i> en Sierra Negra podría ser factor importante que inclinará la decisión final. • Si bien ofrece una gran oportunidad para la ciencia en México, representa también un desafío tanto en términos de formación de personal e integración de grupos como de diseño y fabricación de equipos e instrumentos y de organización operativa proyectada a largo plazo. • Se propone: (a) constituir un grupo iniciador a partir de las instituciones participantes; (b) trazar y llevar a cabo un plan para su evolución a lo largo del tiempo, paralelamente con el avance de la construcción de la infraestructura.
Impacto potencial	<ul style="list-style-type: none"> • El proyecto aportará conocimientos fundamentales sobre las características de fuentes astrofísicas de altas energías galácticas y extragalácticas en todo el cielo visible desde el sitio tanto para fuentes estáticas como transitorias. • Por razón natural concentrará proyectos, investigadores y grupos de todas partes del mundo y por lo tanto representará una oportunidad única para la formación de personal y la generación de nuevos conocimientos.

Instituciones participantes	Institutos de Astronomía, Ciencias Nucleares, Física y Geofísica de la UNAM, así como el INAOE.
Tiempo estimado	El plan de desarrollo del grupo iniciador debería estar constituido antes de finalizar 2014.
Recursos necesarios	El proyecto está financiado por el consorcio CTA y se estima que costará más de 50 millones de euros. En caso de seleccionarse el OAN-SPM se esperaría que México aportara, además del sitio, unos 5 millones de dólares.

**Desarrollo, dominio y difusión de capacidad
de observación e investigación en astronomía en México**

Propósito	Dar a conocer ampliamente la importancia de la astronomía para la sociedad y despertar el interés de profesionales, estudiantes e instituciones del país por sus actividades y sus aportaciones.
Antecedentes	El número de investigadores profesionales en astronomía registrados en nuestro país es de sólo 234: apenas dos por cada millón de habitantes. No obstante, reportan logros importantes tanto por sus aportaciones al conocimiento como por su participación en proyectos de cooperación internacional que generan recursos de inversión.
Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • La comunidad de investigadores en astronomía presenta un nivel académico excepcional: 225 son doctores y 191 son investigadores nacionales. Más de 70% se doctoraron fuera del país. • Para atender a la demanda de personal formado que plantean las alianzas y proyectos con grupos internacionales habrá que multiplicar varias veces la plantilla disponible. Si sólo se piensa en duplicarla en 10 años habría que incorporar cada año 23 nuevos investigadores. • Habría varias formas de hacerlo: atraer investigadores de otros países, enviar estudiantes a posgrados o estancias en el exterior, intensificar la formación de jóvenes investigadores por sus líderes académicos, aumentar el número de programas de posgrado en el país, aumentar su matrícula, etc. • Todas estas opciones implican aumentar el número de candidatos. • Se propone concertar y poner en marcha un programa de formación de investigadores en Astronomía a lo largo de tres líneas: inducir el interés de los niños a través de asignaturas o actividades escolares o virtuales, organizar estancias temporales de investigadores líderes en instituciones de educación superior interesadas en desarrollar capacidades, apertura de concursos por plazas de investigación en instituciones dispuestas a desarrollar unidades propias. • Es esencial que el programa sea interinstitucional, lo que facilitaría su realización y optimizaría el aprovechamiento de los recursos de todos.

Impacto potencial	<ul style="list-style-type: none"> • Se darían a conocer a la sociedad resultados e impactos de la investigación en astronomía . • Se contribuiría a despertar vocaciones tempranas en los niños. • Se apoyaría el desarrollo de carreras de investigación a partir de la propia intervención de los interesados desde los primeros pasos. • Se dispondría de las becas y las plazas de investigador necesarias.
Instituciones participantes	UNAM, INAOE, Universidades de Guadalajara, Guanajuato, Sonora, Conacyt.
Tiempo estimado	El diseño del programa podría tomar hasta 4 meses; su realización y seguimiento durarían varios años.
Recursos necesarios	<p>Las propias instituciones participantes cubrirían los costos en que incurriesen para el diseño del programa.</p> <p>Los que resulten necesarios para su ejecución se negociarán entre las instituciones, las instancias cuya participación se identifique como relevante y los gobiernos federal y locales.</p>

Créditos del programa
HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO



CRÉDITOS DEL PROGRAMA

HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO

Comité organizador: Jorge Flores Valdés, Enrique Cabrero Mendoza, José Antonio de la Peña, José Franco, Salvador Malo, Luis Mier y Terán, Sergio Revah, Julio Sotelo, Francisco Valdés Ugalde y José Enrique Villa Rivera.

Comité técnico: Jaime G. de la Garza Salazar, Rigoberto Aranda Reyes, Ana del Río Guzmán, José Antonio Esteva Maraboto, Karla Rivas Salas, Víctor Muñoz Morales, Edmundo Álvarez Flores y Martha Beltrán y Tenorio.

Responsables de mesa:

Julián Adolfo Adame, Martín Aluja, Carlos Arias, Raúl Arias Lovillo, Marcelino Barboza Flores, Francisco Barnés de Castro, Teresa Bracho, Carlos Campillo Serrano, Julia Carabias, Alberto Carramiñana, Rolando Cordera, Sabino Chávez Cerda, José Antonio de la Peña, Elder de la Rosa, Rodolfo de la Rosa Rábago, Mayra de la Torre, Raúl Delgado Wise, Agustín Escobar, Elva Escobar, Adrián Fernández-Bremauntz, Héctor Felipe Fix-Fierro, Daniel Flores Curiel, Ernesto Flores-Roux, Noé Arón Fuentes, Amanda Gálvez, Virginia García Acosta, Juan Eduardo García García, Carlos Gay, Samuel Gómez Noguera, Jesús González Hernández, Federico Graef, Luis Felipe Guerrero Agripino, Tonatiuh Guillén, Luis Miguel Gutiérrez, Adolfo Guzmán Arenas, Alejandro Hernández, Pedro Hugo Hernández, Inocencio Higuera, Eusebio Juaristi, William Lee, Soledad Loaeza, Sergio López Ayllón, Marcelo Lozada y Cassou, José Luis Lucio, Guido Marinone, Ana María Martínez, Alicia Mayer, Marisa Mazari, María Elena Medina-Mora, Francisco Javier Mendieta, María Isabel Monroy, Dante Morán Zenteno, Pablo Mulás del Pozo, Guillermina Natera, Francisco P. Navarro Reynoso, Juan Nepote, Adalberto Noyola Robles, Lorenzo Olguín Ruiz, Sylvia Ortega, Jorge Padilla, Francisco Palomera, Ma. de Lourdes Patiño Barba, Elaine Reynoso Haynes, David Ríos, Mariano J.J. Rivera Meraz, Rafael Rivera, Oliverio Santiago Rodríguez Fernández, Enrique Ruelas Barajas, Rosaura Ruíz, Beatriz

Rumbos, Mario César Salinas, Antonio Sánchez Bernal, Víctor Sánchez-Cordero, Jorge Santamaría Fernández, Sylvia Schmelkes, Arturo Serrano Santoyo, Xavier Soberón, Julia Tagüeña, Ricardo Tapia Iburgüengoytia, Fernando Toro, Manuel Torres Labansat, Jaime Urrutia, Francisco Valdés Ugalde, Javier Velázquez Moctezuma y Guillermo Villalobos Zapata.

Ponentes: Adrián Acosta Silva, Julián Adolfo Adame Miranda, Carlos Aguilar, Luis Aguilar, Alfredo Aguilar Elguezabal, Ana María Aguilar Argaez, Raúl Aguilar-Roblero, Enrique Aguilar Rodríguez, José Antonio Alcántara, Víctor Alcaraz, Ismeli Alfonso, Sergio Almazán Esqueda, Ángel Alpuche Solís, Celia Alpuche-Aranda, Saúl Álvarez Borrego, Jesús Álvarez Calderón, Porfirio Álvarez, Jorge Ancheyta, Celestino Antonioli, Rigoberto Aranda, José Luis Arauz Lara, David Arellano Gault, Itziar Arextaga, Carlos Arias, Raúl Arias Lovillo, Pedro Arroyo Acevedo, René Asomoza Palacio, Alfredo Ávila Rueda, Juan Azorín Nieto, José Ramón Azpiri López, Joaquín Azpiroz, Marcelino Barboza, Francisco Barnés de Castro, Francisco Barnés Regueiro, Hugo Barrera, Rebeca Barriga Villanueva, Tim Baumgartner, Enrique Bazúa-Rueda, Valeria Belloro, Ricardo Benavides Pérez, Shoshana Berenzon, Carlos Beyer, Monserrat Bizarro, Martín Bonfil, Marco Borja, Carlos Bosch, Pedro Bosch, Felipe Bracho, Teresa Bracho, Héctor Bravo-Alfaro, Vicente Bringas Rico, Estrella Burgos, Gerardo Cabañas Moreno, Enrique Cáceres Nieto, Aleida Calleja, Sergio Camacho Lara, Carlos Campillo, Alejandro Canales, Fernando Cano Valle, Blondy Canto, Julia Carabias, Rosario Cárdenas, Sergio Cárdenas, Anabela Carlón, Alberto Carramiñana, Alma Carrasco, Sergio Carrera Riva Palacio, Laura Carrillo, María Amparo Casar, Margarita Casas, Rosalba Casas, Gonzalo Castañeda Ramos, Eduardo Castañón, Víctor M. Castaño Meneses, Manuel Ángel Castillo, Francisco Castrejón, Gerardo Ceballos, Jorge Cerdio, Carlos Coello Coello, Rafael Colás Ortiz, César Andrés Conchello Brito, Óscar Fernando Contreras Montellano, Atilano Contreras Ramos, Rolando Cordera, Ricardo Córdova Quiroz, Fernando Cortés, Cristina Cortinas de Nava, José Ramón Cossío, Helena Cotler, Carlos Chávez, Sabino Chávez, Xavier Chiappa Carrara, Lars Christenson, Leonardo Dagdug Lima, Patricia Dávila Aranda, José de Anda, Romeo de Coss, María de Ibarrola, Camilo de la Fuente, Juan Ramón de la Fuente, Jaime G. de la Garza Salazar, Guillermo de la Peña, José Antonio de la Peña, Ramón de la Peña, Sergio de Régules, Rodolfo de la Rosa, Elder de la Rosa, Mayra de la Torre, Rafael del Villar, Guillermo Delgado Lamas, Raúl Delgado Wise, Ángel Díaz Barriga, Frida Díaz Barriga, Lorenzo Díaz Cruz, Néstor Díaz, Rufino Díaz, Alberto Díaz-Cayeros, Eloisa Díaz-Francés, Graciano Dieck Assad,

Paulette Dieterlen, Manuel Dorador González, César Augusto Domínguez, Anahí Dresser, Saurabh Dube, Jorge Durand, José Ramón Eguibar, Alexander Elbittar, Armando Encinas Oropeza, Agustín Escobar, Elva Escobar, Federico Escobar Sarria, Vladimir Escobar, Roberto Escudero, Luis Estrada, Andrés Fábregas Puig, Jesús Favela Vara, Héctor Felipe Fix-Fierro, Adrián Fernández-Bremauntz, Rafael Fernández de la Garza, Luca Ferrari, Daniel Flores Curiel, Julia Flores Dávila, Jorge Flores Valdés, Ernesto Flores-Roux, José Franco López, Noé Arón Fuentes, Isaura Fuentes, Luis Fuentes, Sergio Fuentes Moyado, Sergio Galina, Amanda Gálvez, Carlos García, Juan Eduardo García García, Mariano García Garibay, Jesús García, Fabián García Nocetti, Carmen García Peña, Martín García Varela, Virginia García Acosta, Ricardo María Garibay, Mario Garza, José Antonio Garzón Tiznado, Carlos Gay, Carlos Gershenson, Samuel Gitler, Luis Arturo Godínez, Gabriel Gójon, Samuel Gómez Noguera, José S. Guichard Romero, Tomás González Estrada, Jesús González González, Luis Fernando González Pérez, Jesús Felipe González Roldán, Carlos González Salas, José Miguel González Santaló, Jorge González-Sánchez, José Luis Gordillo Moscoso, José Gordon, Andrés Govela Gutiérrez, Federico Graef Ziehl, Manuel Grajales Nishimura, Víctor Guerra, Luis Felipe Guerrero Agripino, Gilberto Guevara Niebla, Diana Guillén, Tonatiuh Guillén, Constantino Gutiérrez Palacios, Luis Miguel Gutiérrez, Adolfo Guzmán Arenas, Roberto Guzmán Zamudio, Anne Hansen, Alejandro Hernández, Carlos Hernández García, Juan Hernández, Onésimo Hernández, Pedro Hugo Hernández, Fausto Hernández Trillo, Sergio Hernández Vázquez, Luis Herrera Estrella, Ismael Herrera Revilla, Inocencio Higuera, David Hiriart, Jorge Huacuz Villamar, Guadalupe Huelsz, Miguel Ángel Huerta Díaz, David H. Hughes, Roberto Iglesias Prieto, Eduardo Iglesias Rodríguez, Salma Jalife Villalón, Manuel Jiménez Dorantes, Luis Felipe Jiménez García, Héctor Juárez Valencia, Eusebio Juaristi, David Kershenobich, Patricia Koleff, Alberto Ken Oyama-Nakagawa, Mina Konigsberg, Esteban Krotz, Federico Kuhlmann, Alfonso Larqué, María Isabel Lázaro Báez, William Lee, Christian Lemaitre, Edgar Leonel Chávez, Gustavo Leyva, José Luis Lezama, Pablo Liedo Fernández, Alberto Lifshitz, Soledad Loaeza, Laurent Loinard, Sergio López Ayllón, José López Bucio, Lizbeth López Carrillo, Malaquías López-Cervantes, Hugo López-Gatell, Jorge López Portillo, Alejandro López Valdivieso, Yolanda López-Vidal, Rafael Loyola, Marcelo Lozada y Cassou, Fernando Lozano, Jesús Eduardo Lozano Ochoa, Rafael Lozano, José Luis Lucio, Francisco A. Llano, Salvador Lluch-Cota, Manuel Maass, Susana Magallón, Daniel Malacara, Salvador Malo, Guido Marinone, Ismael Mariño Tapia, Javier Márquez Díez-Canedo, César Martinelli Montoya, Ana María Martínez, Jorge Martínez,

Martha Martínez Gordillo, Alfredo Martínez Jiménez, Manuel Martínez Lavín, Adolfo Martínez Palomo, Omar Masera, José Luis Mateos Trigos, Alicia Mayer, Marisa Mazari, Magdaleno Medina Noyola, María Elena Medina-Mora, Enrique Mejía, Jorge Meléndez, Francisco Mendieta, Blanca Mendoza, Eduardo Mendoza, Fernando Mendoza, Víctor Manuel Mendoza, Carlos Merchán Escalante, Horacio Merchant Larios, Robert Meyers, Tomás Miklos, Francisco Miranda, Pedro Moctezuma Barragán, María Isabel Monroy, Alejandro Monsiváis, Luis Montaña Hirose, Ulises Mora Álvarez, Dante Morán Zenteno, Alfonso Morales, José Luis Morales, Miguel Ángel Moreles, Luis Moreno, Oscar Moreno-Valenzuela, Enrique Morett, Juan José Morrone Lupi, Mónica Moya, Pablo Mulás del Pozo, Stephen Mull, David Muñoz, Norma Patricia Muñoz Sevilla, Juan Carlos Murrieta, Guillermina Natera, Arnulfo Hernán Nava Zavala, Hugo Navarro, Francisco Navarro Reynoso, Dámaso Navarro Rodríguez, Ana Claudia Nepote, Juan Nepote, Humberto Nicolini, Roldo Nieva Gómez, Cecilia Noguéz, Adalberto Noyola Robles, Juan Núñez Farfán, Octavio Obregón, Patricia Ocampo, Lorenzo Olguín, Marina del Pilar Olmeda, Roger Orellana, Luis Orozco, Fausto Ortega, Fernando Ortega Gutiérrez, Sylvia Ortega, Benjamín Ortíz- Espejel, Patricia Ostrosky, Jorge Padilla González, Enrique Pacheco Cabrera, César Pacheco Tena, Federico Páez-Osuna, Carlos Pallán Figueroa, Francisco Palomera, Víctor Hugo Páramo, María del Carmen Pardo, Raúl Paredes Guerrero, Vicente Parra Vega, Susan Parker, Ma. de Lourdes Patiño, Manuel Peimbert, Eduardo Peña, Daisy Pérez Brito, Ramiro Pérez Campos, Alicia Pérez Duarte, Edward Peters, Alonso Picazo, Daniel Piñero Dalmao, Francisco Piñón Gaytán, Alejandro Pisanty, Gregorio Posada Vanegas, Enrique Provencio, Jean François Prud'homme, Martín Puchet, Mario Ramírez Cobián, Tonatiuh Ramírez Octavio, Jorge Ramírez- Solís, Francisco Ramos Gaudencio, Gerardo Ramos Larios, Gaudencio Ramos Niembro, Jesús Gabriel Rangel- Peraza, Elías Razo Flores, Justino Regalado, Teresita de Jesús Rendón, Daniel Reséndiz, Hortensia Reyes, Jorge Alejandro Reyes, Enrique Reynaud, Elaine Reynoso, Emilio Ribes, Horacio Riojas, Leonardo Ríos Guerrero, Ernesto Ríos Patrón, David Ríos Jara, Rafael Rivera, Sandra Rodil Posada, Alejandro Rodríguez Ángeles, Fernando Rodríguez de la Garza, Pedro F. Rodríguez Espinosa, Oliverio Santiago Rodríguez Fernández, Roberto Rodríguez Gómez, Luis Felipe Rodríguez Jorge, Ariel Rodríguez Kuri, Roberto Rodríguez, Yosú Rodríguez, Leopoldo Rodríguez-Sánchez, José Roldán Xopa, Julio Cesar Rolón, David Romero, Fermín Romero, Miguel Romero, Andrew Roth Seneff, Raúl Rueda, Enrique Ruelas, Lena Ruiz, Rosaura Ruíz, Beatriz Rumbos, Emilio Sacristán Rock, Gerardo Salazar Chávez, Mario César Salinas, Armando Salinas

Rodríguez, Antonio Sánchez, Federico Sánchez, Víctor Sánchez-Cordero, Oscar Sánchez Escandón, Aarón Sánchez Juárez, José Luis Sánchez Llamazares, Javier Sánchez Mondragón, Carmen Sánchez Mora, Francisco Sánchez-Sesma, Juan José Sánchez Sosa, Jorge Santamaría, Víctor Santibáñez Dávila, Saúl Santillán, Carlos Santos-Burgoa, Edgar Santoyo Gutiérrez, José Sarukhán, Jaime Sempere Campello, John Scott, Silvia Schmelkes, Rita Schwentenius, José María Serna de la Garza, Arturo Serrano, Larry Smarr, Xavier Soberón, Isidro Soloaga, Fabiola Sosa, Plinio Sosa, Julio Sotelo, Luis A. Soto González, Horacio Soto, Daniela Spenser, Christopher Stephens, José Emilio Suárez, Enrique Sucar, Vinicio Suro, Julia Tagüeña, Ricardo Tapia Ibarguengoytia, José Antonio Toledo, Fernando Toro, Miguel Torres, Manuel Torres Labansat, Luis Gerardo Trápaga Martínez, Fernando Tudela, Rodolfo Tuirán, Rosa Elena Ulloa, Jaime Urrutia, Francisco Valdés Ugalde, Luis Valtierra González, Oscar Valle Molina, Luis A. Vargas Guadarrama, Rafael Vázquez-Duhalt, Gerardo Vázquez Nin, Roberto Vázquez Meza, Antonio Vega Corona, Ambrosio Velasco, Jorge Velasco Hernández, Enrique F. Velázquez Contreras, Javier Velázquez Moctezuma, Salvador Venegas-Andraca, Basilio Verduzco, Jean-Philippe Vielle-Calzada, Luis Villa Vargas, Juan Villalvazo Naranjo, Jesús Villar Rubio, Luis Manuel Villaseñor, Guillermo Villalobos Zapata, Sergio Viñals, Ricardo Viramontes Brown, Cisco Werner, Trevor Williams, Veronika Wirtz, Rebeca Wong, Luis Zambano, Guillermo Zárate de Lara, Gisela Zaremberg, Jorge Zavala Hidalgo, Luis Zavala Sansón, Juan Fidel Zorrilla y Margarita Zorrilla.



INSTITUCIONES DE ADSCRIPCIÓN DE LOS PARTICIPANTES

Academia de Ingeniería de México, A. C.
Academia Mexicana de Ciencias, A. C.
Academia Nacional de Medicina
Agencia Espacial Mexicana
Asociación Mexicana de Derecho a la Información, A. C.
Banco de México
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Cámara Minera de México
Cámara Nacional de la Industria Electrónica de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información
Centro de Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste
Centro de Cooperación Regional para la Educación de Adultos en América Latina y El Caribe
Centro de Educación Aeroespacial de México en Jalisco
Centro de Estudios Universitarios
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C.
Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A. C.
Centro de Investigación en Matemáticas A. C.
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.
Centro de Investigación en Química Aplicada

Centro de Investigación en Sistemas de Salud
Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Peñoles
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica
Centro de Investigación y Docencia Económicas, A. C.
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C.
Centro de Investigaciones en Óptica
Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social
Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas
Centro Médico ABC
Centro Regional de Enseñanza de Ciencia y Tecnología del Espacio para América Latina y el Caribe
Colegio de Ingenieros Mecánicos y Electricistas, A. C.
Comisión Federal de Electricidad
Comisión Nacional contra las Adicciones
Comisión Nacional del Agua
Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
Comisión Reguladora de Energía
Consejo Consultivo de Ciencias
Consejo Mexicano de Investigación Educativa, A. C.
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Consejo Puebla de Lectura A. C.
Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España
Coordinación General Institutos Nacionales de Salud
Corporación Universitaria para el Desarrollo de Internet, A. C.
El Colegio de la Frontera Norte
El Colegio de la Frontera Sur
El Colegio de México, A. C.
El Colegio de Michoacán, A. C.

El Colegio de San Luis, A. C.
El Colegio Nacional
El Fondo de Información y Documentación para la Industria
El Instituto de Ecología, A. C.
Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales
Foro Consultivo Científico y Tecnológico, A. C.
Grupo Financiero Banorte
Grupo México
Guadalupe de Guaymas, S.P.R. de R. L.
Hacia una Cultura Democrática, A. C.
Hospital General de México
Hospital Psiquiátrico Infantil *Juan N. Navarro*
Industrias Bre, S. de R. L. de C. V.
Instituto de Investigaciones *Dr. José María Luis Mora*
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Instituto Estatal Electoral de Baja California
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Instituto Mexicano del Petróleo
Instituto Nacional de Antropología e Historia
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Instituto Nacional de Cancerología
Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición *Salvador Zubirán*
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
Instituto Nacional de Geriátrica
Instituto Nacional de Medicina Genómica
Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía
Instituto Nacional de Psiquiatría *Ramón de la Fuente*
Instituto Nacional de Salud Pública
Instituto Politécnico Nacional
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C.

Instituto Tecnológico Autónomo de México
Instituto Tecnológico de Culiacán
Instituto Tecnológico de la Laguna
Instituto Tecnológico de Sonora
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
International Association of Universities
Internet Society
Nuevas Alternativas Naturales Thermafate S. A. de C. V.
Organización Panamericana de la Salud
Petróleos Mexicanos
Secretaría de Comunicaciones y Transportes
Secretaría de Educación Pública
Secretaría de Energía
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Secretaría de Relaciones Exteriores
Secretaría de Salud
Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal
Sociedad de Beneficencia Española
Sociedad Química de México
Sociedad Mexicana para la Divulgación de la Ciencia y la Técnica, A. C.
Southwest Fisheries Science Center
Stanford University
Sulfagenix, Inc.
Suprema Corte de Justicia de la Nación
The University of Arizona
The University of California, San Diego
The University of Texas, Medical Branch at Galveston
Universidad Autónoma de Aguascalientes
Universidad Autónoma de Baja California
Universidad Autónoma de Campeche

Universidad Autónoma de Chiapas
Universidad Autónoma de Chihuahua
Universidad Autónoma de Guadalajara
Universidad Autónoma de la Ciudad de México
Universidad Autónoma de Nuevo León
Universidad Autónoma de Querétaro
Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Universidad Autónoma de Sinaloa
Universidad Autónoma de Tabasco
Universidad Autónoma de Tlaxcala
Universidad Autónoma de Yucatán
Universidad Autónoma de Zacatecas
Universidad Autónoma del Carmen
Universidad Autónoma del Estado de México
Universidad Autónoma Metropolitana
Universidad de Guadalajara
Universidad de Guanajuato
Universidad de Sonora
Universidad Iberoamericana
Universidad Intercultural del Estado de Chiapas
Universidad La Salle
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Universidad Nacional Autónoma de México
Universidad Pedagógica Nacional
Universidad Veracruzana
University of Colorado
University of Maryland



Astronomía y Astrofísica

de la colección HACIA DÓNDE VA LA CIENCIA EN MÉXICO,
se terminó de imprimir en abril de 2014 en los talleres
de Impresores en Offset y Serigrafía, S.C. de R.L. de C.V.
Pascual Orozco 53, colonia Barrio San Miguel, México, D.F.

El tiraje consta de 3,500 ejemplares.

En su composición se utilizaron tipos de la familias
Myriad y Warnock y se utilizó papel couché de 135 grs.

Cuidaron esta edición:

Ana del Río y Rigoberto Aranda.

Diseño editorial: Asesoría Gráfica

